



**Modelo matemático de um sistema designador de embalagens via
programação matemática e ciência da computação como uma alternativa
de mensuração aplicada no setor industrial**

Vinicius Moretti

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

e-mail: vinimoretti20@hotmail.com

Custódio Da Cunha Alves

Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE)

e-mail: custodio.alves@gmail.com

Resumo

A embalagem é considerada um dos elementos-chave que pode apoiar e promover melhorias e inovações na gestão sustentável das cadeias de abastecimento. O principal objetivo e questão de pesquisa desse trabalho é explorar em que medida a promoção e implementação das melhores práticas organizacionais de gerenciamento podem ser aplicadas a um sistema designador de embalagem numa empresa líder em tecnologia de tubulações plásticas do norte de Santa Catarina. Para atingir tal objetivo, o desenvolvimento de um modelo matemático em linguagem AMPL enquadrado dentro de uma abordagem de logística de embalagem sustentável é proposto como alternativa de mensuração dos principais fatores que contribuem efetivamente para melhoria da eficiência, redução de custos e otimização do desempenho sustentável das cadeias de abastecimentos numa perspectiva de modelos de economia circular em transição. Conforme metodologia adotada, o objeto de pesquisa desse trabalho é avaliar a otimização dos custos totais desse sistema designador de embalagens sob a ótica da eficiência e sustentabilidade das operações da cadeia de abastecimentos. Os resultados obtidos a partir desse trabalho indicam que o desenvolvimento dessas melhores práticas tem contribuído ativamente para aumentar desempenho geral do sistema designador de embalagem avaliado no contexto de uma gestão de embalagem sustentável.

Palavras-chave: AMPL; Sistemas de embalagens; Eficiência com sustentabilidade; Economia circular.

Abstract

Packaging is considered one of the key elements that can support and promote improvements and innovations in the sustainable management of supply chains. The main objective and research question of this work is to explore the extent to which the promotion and implementation of best organizational management practices can be applied to a packaging designator system in a leading company in plastic piping technology in northern Santa Catarina. To achieve this objective, the development of a mathematical model in AMPL language framed within a sustainable packaging logistics approach is proposed as an alternative for measuring the main factors that effectively contribute to improving efficiency, reducing costs and optimizing the sustainable performance of supply chains from a perspective of circular economy models in transition. According to the adopted methodology, the research object of this work is to evaluate the optimization of the total costs of this packaging designing system from the perspective of efficiency and sustainability of operations in the supply chain. The results obtained from this work indicate that the development of these best practices has actively contributed to increase the overall performance of the packaging designator system evaluated in the context of sustainable packaging management.

Keywords: AMPL; Packaging systems; Efficiency with sustainability; Circular economy.

1. Introdução.

As organizações atualmente estão enfrentando uma nova economia globalizada motivada por desafios cada vez mais exigentes. Hoje, seus concorrentes podem estar em qualquer lugar do planeta e a sobrevivência no mercado está condicionada a melhoria contínua de seus processos desde a fabricação até a entrega de seus produtos. Tal cenário inter-organizacional fundamentado em análise de processos industriais estabelece cada vez mais, uma demanda crescente por eficiência, sustentabilidade, eliminação de desperdícios e otimização de recursos existentes. (RICARDO, et al., 2013). Neste contexto, todo e qualquer esforço que envolve melhoria contínua e redução de custos em processos, desde os insumos produtivos até o sistema de embalagens para entrega de produtos que envolva um bom gerenciamento operacional contribuem para garantir a melhoria da qualidade e manter preços competitivos (REGATTIERI, et al., 2019).

O sistema de embalagens possui implicações significativas nas operações de gestão ambiental. Com gerenciamento das operações bem-sucedido a embalagem assume um papel fundamental ao longo de toda a cadeia de abastecimento e deve estar conectada aos aspectos de logística, marketing, produção

e meio ambiente (HELLSTRÖM & OLSSON, 2017). Um sistema de gerenciamento ambiental é um conjunto de processos e procedimentos de gestão que permitem a uma organização analisar, controlar e reduzir o impacto ambiental de suas atividades, produtos e serviços e operar com maior eficiência e controle (MOURA, 2021).

Segundo Pålsson & Sandberg (2020), a embalagem influencia cada atividade logística em toda a cadeia de abastecimento desde o ponto de enchimento ao ponto de esvaziamento, bem como diversas atividades dentro da logística reversa e do fim de vida das embalagens, como devolução, reciclagem e reaproveitamento. A embalagem pode e deve ser considerada um dos elementos-chave que promovem o desempenho da cadeia de suprimentos em termos de eficiência e sustentabilidade (GARCÍA-ARCA et al., 2021).

O gerenciamento sustentável da cadeia de abastecimentos envolve o planejamento, execução e controle dos processos de criação de valor corporativo ao longo de toda a cadeia de suprimentos, integrando aspectos econômicos, ambientais e sociais na tomada de decisões com o objetivo de melhorar o desempenho de longo prazo e reduzir riscos, ou seja, a relação entre sustentabilidade e competitividade nas cadeias de abastecimento (GARCÍA-ARCA et al., 2017). Nesta perspectiva, segundo Negri et al. (2021), a relação entre cadeias de abastecimentos bem como a resiliência é de particular importância a nível prático capaz de facilitar a implementação de cadeias produtivas eficientes e sustentáveis.

Nos últimos anos, a crescente popularidade de conceitos como economia circular (EC) e meio ambiente, a embalagem e sua relação com a sustentabilidade e o gerenciamento das cadeias de abastecimento mais resilientes em uma EC em transição têm sido objeto de estudo de vários especialistas de desenvolvimento sustentável que fornecem o aumento da demanda por recursos naturais decorrentes do aumento da população global (ABDUL-HAMID, et al., 2020; ABIDEEN, et al., 2021 & LIU, et al., 2022). Para tal cenário, uma mudança do tradicional modelo de economia *linear* para uma economia *circular* se faz necessário antes que o aumento da demanda por recursos naturais exerça a pressão sobre o meio ambiente (GOVINDAN & HASANAGIC, 2018; MEHERISHI, et al., 2019).

Os modelos de gerenciamento sustentável da cadeia de abastecimentos desenvolvidos sob a ótica de EC se concentram na redução do desperdício e na melhoria da utilização de recursos para melhorar o desempenho econômico. Segundo Alkhuzaim (2021), à medida que as cadeias de suprimentos se tornam mais complexas, a EC se posiciona para ajudar a abordar as questões de sustentabilidade ambiental.

O principal objetivo e questão de pesquisa deste trabalho é explorar em que medida a promoção e implementação das melhores práticas organizacionais em gerenciamento de sistemas de embalagens, enquadradas numa abordagem de logística de embalagem sustentável ajudam ativamente a melhorar a eficiência e o desempenho sustentável das cadeias de abastecimentos no contexto de modelos de economia circular em transição.

O artigo está estruturado em duas etapas. Em primeiro lugar, uma metodologia que facilite, de forma abrangente, a tomada de decisão no projeto de sistemas de embalagens de forma a reduzir os custos totais. Para isso, são estabelecidas estratégias de gerenciamento da cadeia de abastecimento e logística que possibilitem a definição, comparação e seleção de uma série de embalagens com suas dimensões associadas que de uma forma geral sejam eficientes e sustentáveis em termos de custos de aquisição, custos logísticos e custos ambientais. A segunda etapa, é utilizada para identificar e analisar o impacto da embalagem no gerenciamento de operações que envolvem as atividades ligadas à fabricação de produtos e consequentemente ao sistema de embalagens ao longo de toda a cadeia de abastecimento cujo propósito é justificar as melhores práticas num contexto de eficiência e sustentabilidade. As operações da cadeia de abastecimentos dessa análise, envolve o processo do sistema designador de embalagens de uma empresa líder em tecnologia para sistemas e soluções de tubulações plásticas localizada no norte do estado de Santa Catarina.

Atualmente, muitas empresas ainda sinalizam maior destaque na fabricação, marketing e vendas sem considerar as interligações entre esses elementos. A justificativa desse trabalho é mostrar a importância de incluir a logística de embalagens e o gerenciamento sustentável da cadeia de abastecimentos no planejamento estratégico pois com a integração de tais aspectos tanto o setor produtivo quanto fornecedores podem reduzir custos, impacto ambiental e aumentar lucros. Além disso, abordar a função da embalagem e sua relação com a sustentabilidade e o gerenciamento da cadeia de abastecimento como um vetor de extrema importância na transição da economia circular.

Para atingir o objetivo principal nesse trabalho uma rotina em linguagem de programação matemática (*A Mathematical Programming Language - AMPL*) é proposta para formular e resolver um modelo matemático de programação linear (PL) cujo propósito é avaliar a eficiência e a sustentabilidade das operações da cadeia de abastecimentos que envolve o processo do sistema designador de embalagens de uma empresa líder em tecnologia de tubulações plásticas do norte de Santa Catarina, cuja modelagem matemática é implementada nesse ambiente de programação.

A principal motivação no escopo do modelo matemático proposto neste trabalho é fundamentada no fato de que, embora a literatura contenha amplo consenso sobre a importante contribuição da embalagem na implantação da sustentabilidade em toda a cadeia de abastecimento, raramente tem sido abordada em um nível quantitativo e organizacional (PALSSON, 2018; REGATTIERI, et al., 2019). Os objetivos específicos consistem em identificar e modelar as variáveis, as restrições e os coeficientes desse problema de PL proposto, bem como abordar a importância do gerenciamento de embalagem na implementação de estratégias sob a perspectiva de desenvolvimento sustentável que contemple a logística de abastecimento como um dos pilares da produção fabril da empresa do sistema designador de embalagens envolvida. A metodologia adotada envolve situações vivenciadas no processo do sistema de embalagens que denotam redução de custos a partir da implantação de melhorias contínuas que justificam e fundamentam a aplicação do modelo matemático de PL proposto, objeto de estudo desse trabalho.

Este artigo está estruturado em cinco seções, incluindo a presente introdução; a seção 2 apresenta um breve referencial teórico preliminar envolvendo fundamentos de programação linear e uma breve descrição da Linguagem de Programação Matemática AMPL, ambiente computacional utilizado para otimização do modelo matemático proposto. Além disso, apresenta uma síntese sobre sistemas de embalagens sob a perspectiva de eficiência e desenvolvimento sustentável da cadeia de abastecimento bem como uma síntese envolvendo o tema economia circular e sustentabilidade; na seção 3, são descritos os procedimentos da metodologia cuja sistemática adotada consiste em formular e desenvolver um modelo matemático de programação linear de um sistema de embalagem em ambiente de linguagem MPL; na seção 4, está a discussão dos resultados; e finalmente, a seção 5, apresenta as considerações finais.

2. Revisão de literatura.

Esta seção traz inicialmente alguns fundamentos básicos, tais como introdução a otimização e a programação linear, preliminares ao estudo da modelagem matemática bem como uma síntese do recurso computacional aplicado para otimização nesse estudo. Em seguida, uma breve discussão sobre a eficiência de sistemas de embalagens com abordagem em logística de embalagem sustentável que estabelece uma relação entre eficiência com sustentabilidade e competitividade em cadeias de abastecimento.

2.1. Introdução à Otimização e à Programação Matemática.

As técnicas de programação matemática, em particular a programação linear (PL) com a incorporação de recursos computacionais têm sido cada vez mais aplicadas na resolução de uma variedade de problemas na indústria e na ciência. É conhecida como um dos mais importantes instrumentos da Pesquisa Operacional - ciência que envolve o desenvolvimento de métodos científicos com a vantagem de incorporar uma equação linear adicional representativa de um dado comportamento que deva ser otimizado para analisar sistemas complexos e tomar decisões (RAGSDALE, 2021).

A programação matemática ou otimização é um campo da ciência de gerenciamento que determina a maneira ideal ou mais eficiente de utilizar melhor os recursos limitados disponíveis como um problema universal direcionado para atingir os objetivos de um indivíduo ou de uma empresa. A otimização cobre uma ampla gama de problemas que compartilham uma meta comum: determinar os valores para as variáveis de decisão de um problema que maximizará (ou minimizará) alguma função objetivo, satisfazendo, ao mesmo tempo, várias restrições (RAGSDALE, 2021).

A técnica de programação linear recebe esse nome porque os problemas de programação matemática aos quais ela se aplica são de natureza linear, ou seja, deve ser possível expressar todas as

funções de um modelo de PL como uma soma ponderada (ou combinação linear) das variáveis de decisão (RAGSDALE, 2021). Assim, o modelo matemático de PL assume a forma geral:

$$\text{Max. ou Min. } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1 x_1 + c_2 x_2, \dots, c_n x_n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a: } & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_2 \\ & \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \{ \leq, =, \geq \} b_m \\ & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

A função linear f em (1), a ser minimizada, é chamada função objetivo, o sistema de equações lineares em (2) define as restrições do problema, juntamente com as condições de não negatividade das variáveis em (3).

Um problema de PL pode ser resolvido utilizando solução gráfica, via método analítico, método Simplex ou ainda aplicando recursos computacionais. O emprego da solução gráfica restringe-se aos casos que envolvem duas variáveis, uma vez que os problemas com três ou mais variáveis são difíceis de serem representados graficamente. Quando esse limite for ultrapassado uma maneira de tentar resolver o problema utilizando o método analítico a seguir.

Considere um sistema $Ax=b$ de m equações lineares e n variáveis, em que $m < n$. Se $m = n$ e as equações são coerentes, o sistema tem uma única solução. Em casos em que $m > n$, pelo menos $m - n$ equações devem ser redundantes. No entanto, se $m < n$ e as equações também forem coerentes, o sistema terá um número infinito de soluções (TAHA, 2015).

Para encontrar uma solução para o sistema $Ax = b$, em que $m < n$, primeiramente escolhe-se um conjunto de variáveis $n - m$ de x , chamadas variáveis não básicas, as quais são atribuídos valores iguais a zero. As m variáveis restantes do sistema, denominadas variáveis básicas são então determinadas cuja solução obtida é a chamada solução básica. Se a solução básica atende as restrições de não negatividade, isto é, as variáveis básicas são não negativas, ela é chamada solução básica factível.

Para o cálculo da solução ótima, basta calcular o valor da função objetivo f de todas as possíveis soluções básicas e escolher a melhor alternativa. O número máximo de soluções básicas a serem calculadas é:

$$C_{n,m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (4)$$

Portanto, o método analítico aplicado analisa todas as possíveis combinações de n variáveis escolhidas m a m , escolhendo a melhor delas. A resolução por um sistema de equações lineares é viável em casos em que m e n são pequenos. Porém, para valores elevados de m e n , o cálculo torna-se impraticável para problemas com muitas variáveis e equações, pois calcula todas as possíveis soluções básicas, para então determinar a solução ótima. Como alternativa, pode ser aplicado o método Simplex para a resolução de qualquer problema de PL, conforme a seguir.

O algoritmo Simplex é um método iterativo que parte de uma solução básica factível inicial e busca, a cada iteração, uma nova solução básica factível, chamada solução básica factível adjacente, com melhor valor na função objetivo, até que o valor ótimo seja atingido (TAHA, 2015).

Considere um problema de otimização linear do modelo de PL escrito na forma geral conforme equações (1), (2) e (3) que garantem que as entradas do algoritmo simplex (maximizar ou minimizar) tenham a mesma estrutura. É importante ressaltar que o desenvolvimento anterior pressupõe o conhecimento de uma solução básica factível inicial. Para que o método simplex possa ser aplicado, precisamos de uma solução básica factível inicial (fase I do algoritmo simplex).

Algumas classes de problemas de otimização oferecem naturalmente essa solução básica factível, por exemplo:

$$\begin{aligned} \text{Max. ou Min. } & f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (5)$$

onde $\mathbf{b} \geq \mathbf{0}$. Após a introdução das variáveis de folga, digamos $\mathbf{x}_j$, temos:

$$\begin{aligned} \text{Max. ou Min. } f(\mathbf{x}) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{x}_j &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq \mathbf{0}, \mathbf{x}_j \geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (6)$$

de modo que a matriz dos coeficientes das restrições agora é dada por $[\mathbf{A} \ \mathbf{I}]$ e uma partição básica factível $\mathbf{B} = \mathbf{I}$: as variáveis *básicas* são as variáveis de folga $\mathbf{x}_B = \mathbf{x}_j$ e $\mathbf{N} = \mathbf{A}$: as variáveis *não básicas* são as variáveis $\mathbf{x}_N = \mathbf{x}$.

A solução básica factível é dada por
$$\begin{cases} \mathbf{x}_B = \mathbf{x}_j = \mathbf{b} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_N = \mathbf{x} = \mathbf{0} \end{cases}$$

Em geral, uma solução básica factível não está disponível e deve ser encontrada (TAHA, 2015).

2.2. A Mathematical Programming Language (AMPL).

A Linguagem de Programação Matemática (A *Mathematical Programming* Language - AMPL) se destina a ser uma ferramenta de programação altamente legível e orientada para o usuário para utilização na escrita e teste de algoritmos matemáticos, em particular algoritmos experimentais para resolver programas lineares de grande escala (DUCHARME, 2012).

A linguagem programação AMPL em meados de 1985 com a finalidade de atender pesquisadores que na época desejavam otimizar e gerar soluções matemáticas para seus problemas. Nessa época, já existiam várias linguagens de programação ou outras formas para resolver este tipo de problema. No entanto, eram linguagens que não se aproximavam visualmente e da sintaxe que era utilizada na modelagem e programação matemática, gerando dúvidas e dificuldades nos usuários. Além disso, tal linguagem foi aperfeiçoada ao longo do tempo e hoje, a AMPL felizmente é uma linguagem de programação capaz de aliar a facilidade de montagem matemática com o rigor e a lógica das linguagens de programação (DUCHARME, 2012).

Estudos recentes como os de Oliveira (2018) que objetivou a otimização de cortes bidimensionais utilizando meta-heurísticas e os de Orindo (2020) que procurou planejar a expansão em sistemas de transmissão de energia elétrica.

A linguagem AMPL possui vários atrativos que influenciaram Pereira & Camargo (2021) na decisão de adotarem como a linguagem do PIFOP (interface de programação para problemas de otimização): 1º) a sua sintaxe expressiva é de fácil entendimento pelos iniciantes na área de modelagem matemática. Existe uma correspondência bastante clara entre os símbolos algébricos que estamos acostumados a utilizar; 2º) conforme estatísticas de utilização do servidor remoto de otimização NEOS server, a linguagem é a mais popular entre seus usuários e 3º) AMPL se enquadra com a maioria dos métodos de otimização comerciais ou gratuitos. Por isso, tais autores consideraram a linguagem AMPL como opção aos usuários de PIFOP para melhor experiência de modelagem matemática.

2.3 Sistemas de embalagens com integração de eficiência e sustentabilidade.

Sendo a embalagem parte importante do produto, projetar uma embalagem é muito mais do que selecionar o material ideal. É entendê-la como um sistema, ou um modelo interdisciplinar que procura explicar operações, comportamentos, informações e outras variáveis que se agrupam com finalidade específica (CABRAL, 2015).

Os sistemas de embalagens têm vários impulsionadores e implicações ao longo da cadeia de suprimentos em marketing, produção, logística, compras e transporte. Avaliar os custos totais de uma solução de embalagem é necessário para definir e melhorar o gerenciamento do sistema de embalagem ideal (REGATTIERI et al., 2019).

Em mercados cada vez mais turbulentos e voláteis, as organizações precisam cada vez mais adotarem estratégias para aumentarem a competitividade de suas cadeias de abastecimento. Nos últimos anos, duas situações afetaram significativamente a competitividade das cadeias de abastecimento: por um lado, a globalização da oferta e das vendas e, por outro, o aumento dos custos das matérias-primas. Esta combinação levou a uma necessidade urgente de tomar medidas para garantir o máximo desempenho em atividades logísticas ao longo de toda a cadeia (transporte, manuseio, armazenamento

e produção), eliminando desperdício ou atividades que não agregam valor em linha com a abordagem Kaizen ou Gestão Enxuta (GARCÍA-ARCA et al., 2017). Neste cenário competitivo e global, a embalagem pode e deve ser considerada um dos elementos-chave que promovem o desempenho da cadeia de suprimentos em termos de eficiência e sustentabilidade (GARCÍA-ARCA et al., 2021).

Em cenários de mercados com maior competitividade, a gestão adequada da cadeia de suprimentos (particularmente, em processos logísticos e produtivos) e a adoção de programas de sustentabilidade são pontos estratégicos nas empresas (GARCÍA-ARCA et al., 2017). Nesse contexto, poucas empresas têm dedicado atenção especial ao impacto do projeto de embalagens, na eficiência logística e na sustentabilidade. Na verdade, a integração entre logística e projeto de embalagem, enfatiza particularmente o seu impacto operacional e organizacional no desempenho da cadeia de abastecimento como um dos suportes de vantagens competitivas no gerenciamento da cadeia de abastecimento numa perspectiva global de eficiência e sustentabilidade (GARCÍA-ARCA et al., 2014, 2017, 2021; NEGRI, et al., 2021).

A utilidade da embalagem não está apenas relacionada à proteção do produto, mas também à promoção da capacidade de diferenciação do produto (função comercial) e à busca pela redução de custos melhorando a eficiência do produto à nível logístico e produtivo (função logística). Segundo Garcia et al., 2017), a contribuição da embalagem para a eficiência logística e produtiva deve ser considerada não só em termos da sua visão *direta* que envolvem processos de abastecimento, embalagem, manuseamento, armazenamento e transporte, mas também de forma *reversa* que incluem reutilização, reciclagem e/ou valorização de resíduos da embalagem. Recentemente, foi introduzida através de legislações a função *ambiental*, não só na logística reversa, mas também na logística direta (SOHRABPOUR, et al., 2016; HELLSTRÖM & OLSSON, 2017; PALSSON, 2018; PALSSON & SANDBERG, 2020; MARTINS, et al., 2019; GARCÍA-ARCA, et al., 2014, 2017, 2019, 2021).

Pesquisadores e fontes de literatura consideram a embalagem como um dos elementos abrangentes que pode apoiar a logística de embalagens para promover melhorias e inovações na gestão sustentável das cadeias de abastecimento resilientes (NEGRI, et al., 2021). Esta visão multifuncional deu origem à abordagem Logística de Embalagens Sustentáveis (*Sustainable Packaging Logistics - SPL*), que se refere à integração do design de embalagens, gestão logística e desenvolvimento de novos produtos (GARCÍA-ARCA, et al., 2017). Nos últimos anos a abordagem logística de embalagens tem sido conceituada como a integração do design e embalagem do produto com a gestão da cadeia de suprimentos (direta e reversa), com ênfase especial em suas repercussões estratégicas e sustentáveis, onde alguns pesquisadores têm contribuído para o desenvolvimento conceitual dessa abordagem [GARCÍA-ARCA, et al., 2014, 2017, 2021; SOHRABPOUR, et al., 2016; HELLSTRÖM & OLSSON, 2017; PALSSON, 2018, PALSSON & SANDBERG, 2020], a maioria dos quais vinculados à Universidade de Lund, na Suécia.

Especialistas de desenvolvimentos sustentáveis proveem que a população global atingirá cerca de nove bilhões de habitantes em 2050 (GOVINDAN & HASANAGIC, 2018). Com esse crescimento populacional, haverá um aumento da demanda por recursos naturais, o que inclui matérias-primas, materiais, água, energia e terras férteis. O aumento da demanda pressionará o meio ambiente. Para esse cenário, uma mudança do tradicional modelo de economia *linear* (levar – fazer – usar – destruir após uso) para uma economia *circular* é necessário antes que o aumento da demanda por recursos naturais exerça a pressão sobre o meio ambiente. O modelo de economia *circular* recebeu atenção global considerável pois oferece a oportunidade de otimizar e promover a produção e o consumo sustentáveis através de novos modelos baseados em crescimento contínuo e recursos ilimitados (GOVINDAN & HASANAGIC, 2018).

Na verdade, a resiliência estratégica para o desenvolvimento sustentável de novas embalagens consiste em mudar a economia global de fluxos lineares para circulares. Tal atitude, é fundamental para enfrentar os desafios de sustentabilidade. Essa transformação conduzirá a uma nova era de oportunidades em eficiência de materiais, inclusão social e abordagens criativas a produtos e serviços. Atualmente, o desenvolvimento de metodologias para seleção de alternativas de embalagem que promova a sustentabilidade em cadeias de abastecimento, em particular sob a ótica de modelos que contemple a economia circular com aplicação no setor industrial tem sido objeto de pesquisa com maior frequência por diversos autores como, por exemplo, FULCONIS & PHILIPP, 2016, 2118; GOVINDAN & HASANAGIC, 2018; BERG, et al., 2018; KOBERG & LANGONI, 2019; MEHERISHI, et al., 2019; VEGTER, et al., 2020; ALKHUZAIM, et al., 2021, CALZOLARI, et al., 2022, LANARAS-

MAMOUNIS, et al., 2022; JOHANSEN, et al., 2022 e muitos outros que abordam a embalagem como um vetor de extrema importância na transição para a economia circular.

É importante ressaltar que felizmente grandes avanços têm despertado o gerenciamento sistêmico de embalagem onde cada vez mais logística de embalagem e economia circular é considerada uma relação sem precedentes num contexto de desenvolvimento sustentável.

O design de logística ambientalmente sustentável surgiu como um dos desafios mais influentes nos últimos anos. Inseridos nesse desafio, pesquisadores suecos começaram recentemente a estudar e a propor várias soluções interessantes destacando importância da gestão de embalagem ambiental na redução do consumo de matéria-prima e geração de resíduos. A redução da quantidade de resíduos de embalagens plásticas está no escopo de interesse de muitos grupos científicos em todo o planeta (FRACKOWIAK, et al., 2016). Nesse sentido, pesquisadores preocupados e comprometidos com o desenvolvimento sustentável estão continuamente em busca de melhorias, novos materiais e novas tecnologias para soluções de embalagens inovadoras, principalmente com foco no meio ambiente e em embalagens biodegradáveis.

Outros desenvolvimentos envolvendo logística de embalagens incluem avanços em tecnologias por radiofrequência RFID (*Radio frequency identification – RFID*) e técnicas de inteligência artificial como um tema importante nas áreas de gerenciamento de logística nos últimos anos (Zou et al., 2014; Huang et al., 2016). Em alguns anos, essas tecnologias provavelmente serão oferecidas como soluções comerciais para rastreabilidade diária de embalagens. Os avanços nas nanotecnologias também devem impactar a logística de embalagens no futuro. Mlalila et al. (2016) discutem novos desenvolvimentos, em particular no setor de alimentos.

2.4 Economia circular e desenvolvimento sustentável.

A economia circular (EC) é um modelo econômico reorganizado focado na coordenação dos sistemas de produção e consumo em circuitos fechados. Neste contexto, a economia circular é um sistema regenerativo de produção e consumo que visa manter as taxas de extração de recursos, de geração de resíduos e de emissões em valores adequados aos limites do planeta, através da circularidade do sistema, redução do seu tamanho e manutenção do valor dos recursos o maior tempo possível dentro do sistema, apoiando-se principalmente no projeto, educação e com capacidade de implementação em qualquer escala (SUÁREZ-EIROA, et al., 2019).

Além disso, a EC como uma ferramenta necessária para promover o desenvolvimento sustentável (DS) é um tema que precisa ser definido de forma que repercute o aspecto tridimensional (economia, meio ambiente e sociedade) do desenvolvimento sustentável (SILLANPÄÄ; NCIBI, 2019; NIKOLAOU, et al., 2021; STEFANAKIS & NIKOLAOU, 2022).

A EC implica uma mudança (transição) da abordagem clássica economia *linear* (pegar, produzir e descartar) para uma abordagem de economia *circular* que envolve (fechar, desacelerar e estreitar) o ciclo de fluxos de materiais. A ideia básica por trás da EC é devolver à fase de produção os produtos em fim de vida que até agora eram destinados à disposição final em aterros sanitários (NIKOLAOU. & SAGARAKIS, 2021).

BRAZ & MELLO (2022) argumentam como as teorias de gestão da cadeia de suprimentos podem contribuir para o desenvolvimento da EC. A argumentação desse estudo acerca de tais teorias, contribuíram substancialmente para reconhecer a diversidade de configurações de redes de abastecimento e como suas dinâmicas e mecanismos de gestão fomentam a economia circular.

A crescente conscientização da sociedade para problemas globais tais como o aquecimento global, consumo enorme de recursos, aumento das desigualdades, problemas ambientais, têm exercido uma forte pressão para que os países e organizações assumam uma agenda progressivamente orientada pelos objetivos e princípios da EC e do DS (PEREIRA, 2021).

Em um estudo envolvendo análise das relações entre EC e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), Rodríguez-Antón et al. (2019) comentam o seguinte: desde que as a Assembleia Geral das *Nações Unidas* aprovaram os oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio no ano 2000 e, em 2015, a *Agenda 2030* para o Desenvolvimento Sustentável (DS) especificados em seus 17 ODS, as mais altas instituições políticas do mundo não deixaram de se preocupar em alcançar a sustentabilidade do planeta.

A Agenda 2030 é um plano de ação em favor das pessoas, o planeta e prosperidade cujo objetivo é fortalecer a paz universal e erradicar a pobreza, como requisito indispensável para o DS. Além disso, esse plano inclui 169 objetivos que visam fazer parte do desenvolvimento do milênio focado nas três dimensões de ODS (econômica, social e ambiental). Ainda em 2015, a Comissão Europeia (CE) elaborou um relatório intitulado “Um Plano de Ação da União Europeia para a EC”, buscando uma transição para uma economia menos linear, em que produtos, materiais e recursos sejam mantidos no sistema pelo maior tempo possível na qual a geração de resíduos é minimizada. O relatório também indicava que, embora seu âmbito de ação estivesse confinado à União Europeia (UE), a EC deveria ser implementada e desenvolvida globalmente.

Assim, uma maior coerência política na ação interna e externa da UE neste domínio será mutuamente reforçada e essencial para a implementação dos compromissos globais assumidos pela União e pelos Estados-Membros da UE, notadamente a ONU Agenda 2030 para o DS e a Aliança G7 sobre eficiência de recursos. Este plano de ação será fundamental para alcançar os ODS até 2030, em particular o Objetivo 12 de garantir padrões sustentáveis de consumo e produção. Maiores detalhes em: (https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-1aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF pág.3). Consequentemente, segundo (Rodríguez-Antón 2019) na mente da Comissão Europeia, a relação que existiria entre a EC e os ODS já estava presente. Desde então, a UE continuou emitindo relatórios e comunicados para acelerar esse processo em busca de uma economia circular, fazendo referências contínuas ao fato de que, através de iniciativas de EC, os ODS seriam cumpridos.

Conforme Nações Unidas (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-consumption-production/>), se a população do planeta atingir 9,6 bilhões de habitantes até 2050, precisaria de recursos que seriam equivalente a três planetas da Terra para manter o estilo de vida que desfrutamos atualmente. Por outro lado, os humanos estão poluindo a água mais rápido do que a natureza recicla e purifica a água de rios e lagos, fazendo com que mais de um bilhão de pessoas ainda não tenham acesso à água potável.

3. Metodologia.

A metodologia adotada como questão de pesquisa para esse trabalho se enquadra como pesquisa quantitativa tanto na classificação de pesquisa axiomática normativa quanto na pesquisa empírica normativa, ou seja, o empirismo remonta à casos práticos e adequação aos modelos à realidade, o axiomático se relaciona com a matemática e construção de modelos, além do termo normativo que está vinculado à ações disponíveis na literatura para buscar tanto a otimização resultado de um problema real, como o empírico (CAUCHIK-MIGUEL, 2018).

A sistemática de aplicação da metodologia proposta nesse trabalho envolve o desenvolvimento de um modelo matemático de programação linear (PL) em linguagem de programação matemática (A Mathematical Programming Language - AMPL). Nesse ambiente de programação uma rotina é desenvolvida cujos procedimentos metodológicos incluem a definição das variáveis de decisão, função objetivo e restrições para formular e resolver o modelo matemático de PL. Tal metodologia envolve situações vivenciadas no processo do sistema de embalagens que denotam redução dos custos totais e a otimização do desempenho sustentável das cadeias de abastecimentos numa perspectiva de modelos de economia circular em transição. Assim, a partir da implantação de melhorias contínuas que justificam e fundamentam à aplicação do modelo matemático de PL sugerido para um sistema designador de embalagem com abordagem “logística de embalagem sustentável” é capaz de permitir uma integração proativa da eficiência e sustentabilidade nas cadeias de abastecimento.

O modelo de programação linear (PL) proposto aplica modelagem matemática implementada em ambiente de programação AMPL para os dados reais do processo que envolve sistema designador de embalagens de uma empresa líder em tecnologia de tubulações plásticas do norte do estado de Santa Catarina, objeto de estudo deste trabalho.

As técnicas de modelagem existentes representam uma pequena parte, mas importante do processo total de resolução de um problema. A resolução do modelo matemático aqui proposto se concentra no aproveitamento de diferentes tipos de cenários comerciais ou industriais. Como um modelo pode ser utilizado para representar um problema ou um fenômeno de decisão, é possível criar um modelo visual do fenômeno que ocorre quando as pessoas resolvem problemas, o que chamamos de processo de resolução de problema (RAGSDALE, 2021). Embora uma variedade de problemas pudesse ser

igualmente válida, o modelo da figura 1 sintetiza os principais elementos das etapas de um modelo visual do processo de resolução de problemas.

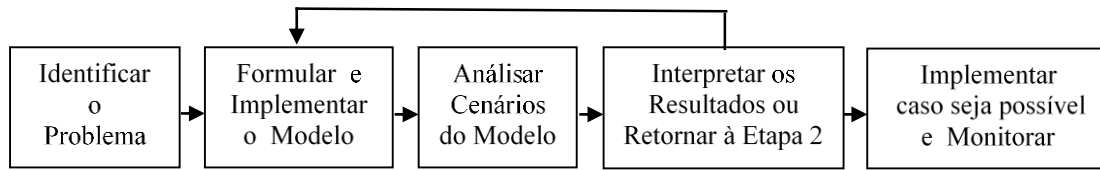


Figura 1 - Processo de resolução de problemas.

Fonte: Adaptado de Ragsdale (2021)

Nos últimos dois anos, um dos obstáculos vivenciados no sistema de embalagens e logística da empresa tem sido a falta de embalagens decorrente da não entrega de embalagens por seus fornecedores por falta de matéria-prima motivados pelos impactos da pandemia Covid-19 que assola o planeta. Com isso, em curto período de tempo, produtos prontos para entrega foram embalados com embalagens alternativas, causando custos elevados e superdimensionamento de embalagens. Tal estratégia para enfrentar a problemática decorrente da pandemia foi motivada para atender clientes em tempo hábil. O vivenciado pelas situações adversas durante a pandemia como a falta de embalagens e a troca de embalagem sem critério, é na verdade, a prova maior que toda a cadeia de abastecimento deve estar conectada desde as operações que envolvem fornecedores até as operações que envolvem a entrega do produto na casa do consumidor.

Para ilustrar a sistemática de desenvolvimento do modelo matemático de PL proposto são utilizados dados, variáveis e restrições reais do processo de sistema de embalagens envolvidos no modelo matemático de PL tais como: tipos de caixas utilizadas para acondicionar produtos, tamanho de cada tipo de caixa, custo unitário de cada tipo de caixa, quantidade disponível, volume disponível e coeficientes de limitações atribuídos.

O modelo matemático desse trabalho é desenvolvido com base nas dinâmicas apresentadas pelo processo do sistema de embalagens da empresa envolvida e fundamentados na metodologia adotada e pela revisão de literatura apresentadas. Tal modelo leva em conta o número de embalagens, custo unitário, disponibilidade e demanda entre os centros fabris.

3.1 Modelagem aplicada ao sistema designador de embalagem na linguagem de programação.

O modelo matemático proposto cujas variáveis de decisão, função objetivo, restrições, bem como implementação dos coeficientes V e μ , são desenvolvidos e resolvidos numa rotina em linguagem de programação (AMPL) e o seu software livre GNU Linear Programming Kit (GLPK) Under Scite Extended Kit (GUSEK), específico para a resolução de problemas de otimização envolvendo programação linear.

3.2 Formulação do modelo matemático.

O modelo matemático é constituído de dois índices que são representados por i e j , onde i representa os produtos e j os centros fabris da empresa envolvida, com $i = 8$ e $j = 4$.

As variáveis de decisão utilizadas são os *tipos de caixas*: α_{ij} (tipo 1), β_{ij} (tipo 2), γ_{ij} (tipo 3), δ_{ij} (tipo 4), ε_{ij} (tipo 5) e θ_{ij} (tipo 6). A função objetivo (equação (1)) corresponde a soma resultante do produto da *quantidade de caixa* pelo *custo unitário de cada tipo de caixa* α'_j (tipo 1), β'_j (tipo 2), γ'_j (tipo 3), δ'_j (tipo 4), ε'_j (tipo 5) e θ'_j (tipo 6) conforme modelo matemático a seguir.

$$\text{Min. } C = \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \cdot \alpha'_j + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \cdot \beta'_j + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \gamma_{ij} \cdot \gamma'_j + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \delta_{ij} \cdot \delta'_j + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon'_j + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \theta_{ij} \cdot \theta'_j \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \cdot \alpha'' + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \cdot \beta'' + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \gamma_{ij} \cdot \gamma'' + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \delta_{ij} \cdot \delta'' + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon'' + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \theta_{ij} \cdot \theta'' \geq \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^4 \phi_{ij} \cdot \phi'' \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \leq \phi \alpha_j \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \leq \phi \beta_j \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^4 \gamma_{ij} \leq \phi \gamma_j \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^4 \delta_{ij} \leq \phi \delta_j \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^4 \varepsilon_{ij} \leq \phi \varepsilon_j \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^4 \theta_{ij} \leq \phi \theta_j \quad (14)$$

$$\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}, \varepsilon_{ij}, \theta_{ij} \geq 0 \quad (15)$$

Assim, a equação (7) representa a função objetivo do modelo matemático para minimizar os custos de todas as caixas. Os parâmetros genéricos (gerais) para a função objetivo equação (8) são os custos da caixa: α'_j (Custo da caixa tipo 1), β'_j (custo da caixa tipo 2), γ'_j (custo da caixa tipo 3), δ'_j (custo da caixa tipo 4), ε'_j (custo da caixa tipo 5) e θ'_j (custo da caixa tipo 6).

Na sequência, temos as equações de restrições e seus respectivos coeficientes e parâmetros.

A primeira restrição conforme equação (7), diz respeito ao volume de caixas relacionado com o volume total do pedido, tendo os seguintes parâmetros adicionais: α'' (volume da caixa tipo 1), β'' (volume da caixa tipo 2), γ'' (volume da caixa tipo 3), δ'' (volume da caixa tipo 4), ε'' (volume da caixa tipo 5) e θ'' (volume da caixa tipo 6) onde ϕ_{ij} é a (quantidade) e ϕ'' (volume) do produto ij . Nos parâmetros relacionados às caixas houve uma mudança significativa, uma vez que o volume das caixas não se altera com relação aos produtos e aos centros da empresa, ou seja, não recebem os índices ij .

Para as demais restrições conforme equações (9), (10), (11), (12), (13) e (14) são apresentados novos parâmetros para a construção de tais restrições conforme quantidade disponível: $\phi \alpha_j$ (caixa tipo 1 para o centro j), $\phi \beta_j$ (caixa tipo 2 para o centro j), $\phi \gamma_j$ (caixa tipo 3 para o centro j), $\phi \delta_j$ (caixa tipo 4 para o centro j), $\phi \varepsilon_j$ (caixa tipo 5 para o centro j), $\phi \theta_j$ (caixa tipo 6 para o centro j).

A última restrição equação (15) do modelo matemático é a restrição de não negatividade, ou seja, essa restrição estabelece que todas as 192 variáveis do modelo assumam somente valores positivos ou nulos.

Os coeficientes V e μ , são valores atribuídos na equação (8) como artifícios para alterar os volumes teóricos das caixas e dos produtos, cujo propósito é o de reduzir o possível *erro prático* na operação de embalagens de produtos. A justificativa para tal é que esse modelo matemático leva em consideração apenas o volume total dos itens e das caixas, e não suas dimensões no espaço. Dessa forma, pode haver situações em que no modelo o volume da caixa respeita o volume dos produtos, isto é, o volume dos produtos é menor do que o da caixa. Assim, de acordo com o modelo, estes produtos poderiam ser acondicionados na mesma caixa. No entanto, na prática, isto pode não acontecer, justamente pela diferença entre as dimensões das caixas e dos produtos, criando espaços vazios e que não podem ser utilizados, reduzindo assim, o espaço útil de armazenamento. Portanto, os coeficientes anteriormente citados podem resolver o problema, criando volumes teóricos diferentes, forçando com que o algoritmo *simplex* encontre uma solução para uma caixa de volume x , quando na verdade, ela possui um volume de $1,2x$. Isso representa que o volume dela é na prática, 20% maior.

Dessa forma, o coeficiente V consiste num coeficiente de redução do tamanho teórico das caixas, e que deve ser menor que 1, devendo ser testado o seu valor correto de acordo com a aplicação. De maneira oposta, o coeficiente μ consiste num coeficiente de aumento do tamanho teórico dos produtos,

e que deve ser maior que 1, e ser testado o seu valor correto de acordo com a aplicação. Os dois coeficientes podem ser utilizados simultaneamente ou não. Vale lembrar, que a não utilização dos coeficientes implica em atribuir valor unitário para ambos.

A figura 2 ilustra como é aplicada a utilização dos coeficientes V e μ citados. Assim, em situações cuja caixa tenha um volume de 100 unidades de medida e for atribuído um valor de 0,9 ao coeficiente V , então o seu volume teórico terá uma redução em 10%. Tal redução, é ilustrado na cor *amarela*. Portanto, a parte na cor *cinza*, consiste no volume restante da caixa que é utilizado pelo modelo.

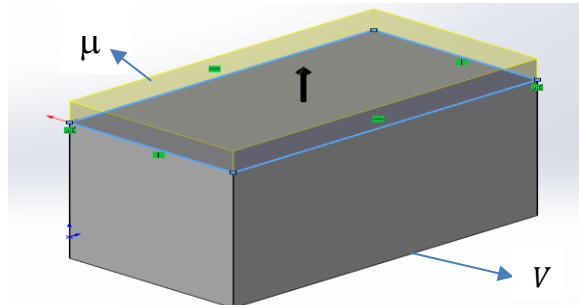


Figura 2 - Exemplo de utilização dos coeficientes V e μ .

3.3 Dados reais de entrada do sistema de embalagem e rotina de programação.

Os dados de entrada para o problema contêm informações acerca dos inputs que o modelo matemático recebeu na sua extensão com dados. Os dados incluem a Quantidade pedida do produto i (linha) para o centro produtivo j (coluna); o Volume dos produtos i em cm^3 ; o Volume das caixas em cm^3 ; Custos das caixas por centro j e a Quantidade de caixas disponíveis por centro produtivo j .

A rotina em linguagem de programação AMPL dos dados reais do sistema designador de embalagens que inclui a declaração dos parâmetros, variáveis e coeficientes conforme figura 3.

```

File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 tcc.mod 2 tcc.dat
1  #Parâmetros#
2
3  param I; ##Produtos
4  param J; ##Centros
5  param QP{1..I,1..J}; ##Quantidade pedida do produto i no centro J
6  param VP{1..I,1..J}; ##Volume dos produtos i no centro j. OBS: Todos os produtos i terão o mesmo volume independente do centro
7  param Ca{1..J}; ##Custo da caixa a para o centro J
8  param Cb{1..J}; ##Custo da caixa b para o centro J
9  param Cc{1..J}; ##Custo da caixa c para o centro J
10 param Cd{1..J}; ##Custo da caixa d para o centro J
11 param Ce{1..J}; ##Custo da caixa e para o centro J
12 param Cf{1..J}; ##Custo da caixa f para o centro J
13 param Va{1..J}; ##Volume da caixa a para o centro J #Todos os J iguais
14 param Vb{1..J}; ##Volume da caixa b para o centro J #Todos os J iguais
15 param Vc{1..J}; ##Volume da caixa c para o centro J #Todos os J iguais
16 param Vd{1..J}; ##Volume da caixa d para o centro J #Todos os J iguais
17 param Ve{1..J}; ##Volume da caixa e para o centro J #Todos os J iguais
18 param Vf{1..J}; ##Volume da caixa f para o centro J #Todos os J iguais
19 param Qa{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa a para o centro J
20 param Qb{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa b para o centro J
21 param Qc{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa c para o centro J
22 param Qd{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa d para o centro J
23 param Qe{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa e para o centro J
24 param Qf{1..J}; ##Qtd disponivel da caixa f para o centro J

```

Figura 3 - Declaração dos parâmetros, variáveis e coeficientes

A figura 4 ilustra a montagem da rotina de programação, transformando a sintaxe matemática apresentada anteriormente na formulação do modelo, em linguagem de programação.

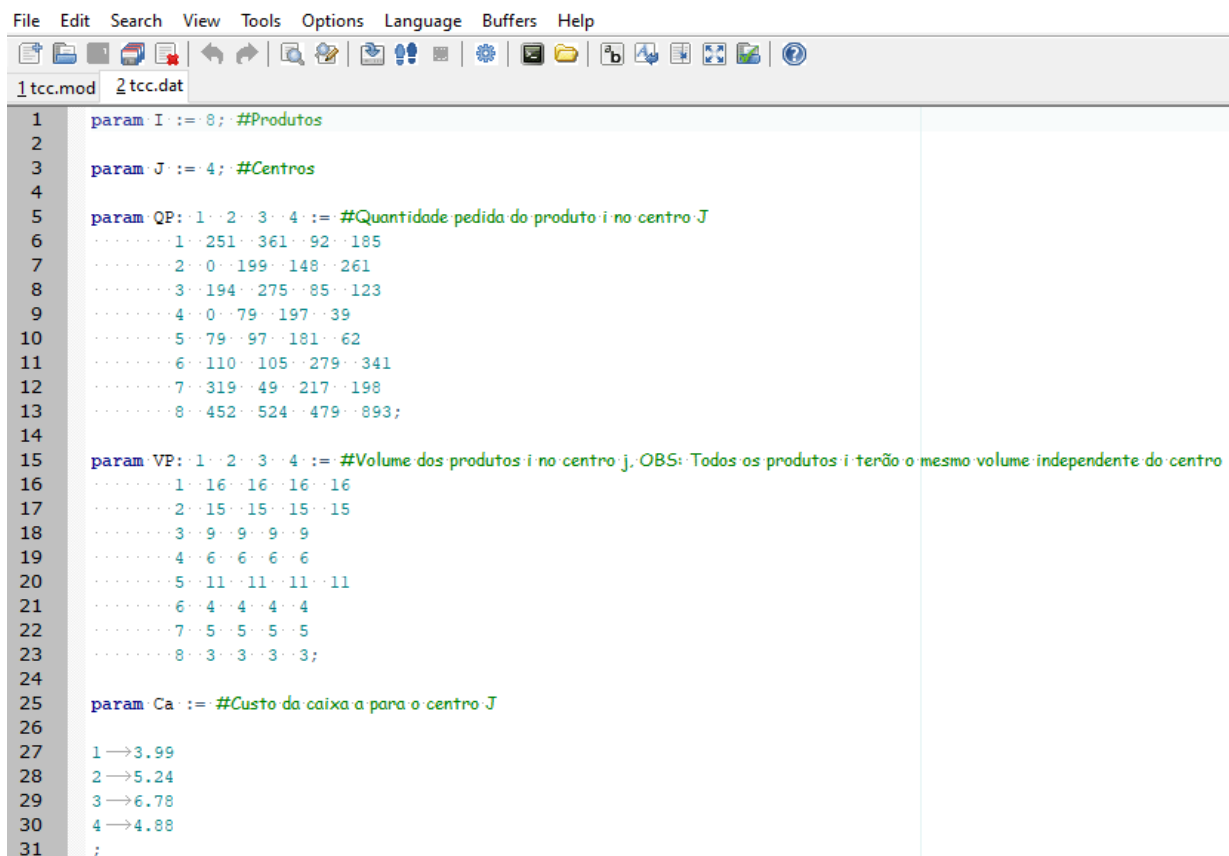
```

33 minimize Custo: sum{i in 1..I, j in 1..J} a[i,j]*Ca[j] + sum{i in 1..I, j in 1..J} b[i,j]*Cb[j] + sum{i in 1..I, j in 1..J} c[i,j]*Cc[j] + sum{i in 1..I, j in 1..J} d[i,j]*Cd[j] + sum{i in 1..I, j in 1..J} e[i,j]*Ce[j] + sum{i in 1..I, j in 1..J} f[i,j]*Cf[j];
34
35 s.t. R1{i in 1..I, j in 1..J}: Va[j]*a[i,j] + Vb[j]*b[i,j] + Vc[j]*c[i,j] + Vd[j]*d[i,j] + Ve[j]*e[i,j] + Vf[j]*f[i,j] >= QP[i,j]*VP[i,j];
36
37 s.t. R2{j in 1..J}: sum{i in 1..I} a[i,j] <= Qa[j];
38
39 s.t. R3{j in 1..J}: sum{i in 1..I} b[i,j] <= Qb[j];
40
41 s.t. R4{j in 1..J}: sum{i in 1..I} c[i,j] <= Qc[j];
42
43 s.t. R5{j in 1..J}: sum{i in 1..I} d[i,j] <= Qd[j];
44
45 s.t. R6{j in 1..J}: sum{i in 1..I} e[i,j] <= Qe[j];
46
47 s.t. R7{j in 1..J}: sum{i in 1..I} f[i,j] <= Qf[j];
48
49 end;

```

Figura 4 - Montagem da rotina de programação no ambiente AMPL

A figura 5 mostra a atribuição de valores aos parâmetros e variáveis, por exemplo, a quantidade pedida de um produto para determinado centro ou o volume do produto.



```

File Edit Search View Tools Options Language Buffers Help
1 tcc.mod 2 tcc.dat
1 param I := 8; #Produtos
2
3 param J := 4; #Centros
4
5 param QP: 1..2..3..4 := #Quantidade pedida do produto i no centro J
6 ..... 1..251..361..92..185
7 ..... 2..0..199..148..261
8 ..... 3..194..275..85..123
9 ..... 4..0..79..197..39
10 ..... 5..79..97..181..62
11 ..... 6..110..105..279..341
12 ..... 7..319..49..217..198
13 ..... 8..452..524..479..893;
14
15 param VP: 1..2..3..4 := #Volume dos produtos i no centro j. OBS: Todos os produtos i terão o mesmo volume independente do centro
16 ..... 1..16..16..16..16
17 ..... 2..15..15..15..15
18 ..... 3..9..9..9..9
19 ..... 4..6..6..6..6
20 ..... 5..11..11..11..11
21 ..... 6..4..4..4..4
22 ..... 7..5..5..5..5
23 ..... 8..3..3..3..3;
24
25 param Ca := #Custo da caixa a para o centro J
26
27 1 -> 3.99
28 2 -> 5.24
29 3 -> 6.78
30 4 -> 4.88
31 ;

```

Figura 5 - Atribuição de valores aos parâmetros e variáveis

4. Resultados e discussão.

Para o sistema designador de embalagem são realizados dois experimentos: um com *variáveis contínuas* e outro considerando *variáveis inteiras* com pequenas alterações nos coeficientes para a características numéricas das variáveis e quantidades. Para este estudo, são realizados testes com as embalagens e os produtos de maneira in loco, para caracterizar a sua eficácia e a avaliação comparativa entre os casos simulados. A tabela 1 retrata os resultados obtidos experimentos 1 e 2 (variáveis contínuas) 3 e 4 (variáveis inteiras) e algumas características da sua resolução, para posteriores discussões, comparações e considerações acerca de cada simulação. Para a realização de tais experimentos considerou-se alguns aspectos com o objetivo de aprimorar o modelo e estabelecer alguns parâmetros de comparações.

Tabela 1 – Simulações realizadas e seus resultados

Experimento	Variável	Tempo de resolução (segundos)	Função Objetivo (R\$)	Casas decimais no volume	Coef. μ	Coef. V
1	Contínua	0,329	124,92	Duas	1	1
2	Contínua	4,325	132,76	Duas	1	1
3	Inteira	607,23	183,21	Duas	1,1	0,9
4	Inteira	0,453	185,16	Duas (terminadas em 5)	1,1	0,9

Os dois primeiros experimentos utilizaram variáveis contínuas, o que facilita e diminui o tempo de resolução (REZENDE, 2021). Conforme resultado obtidos de tais experimentos revelam a presença de tempos distintos de acordo com os coeficientes arbitrados.

Embora o tempo para a resolução desses modelos seja satisfatório, o seu resultado tem pouco desempenho prático, uma vez que lida com variáveis contínuas e dificilmente chegará em respostas ótimas e inteiras, o que impossibilita o seu uso prático (LACHTERMACHER, 2017), (TAHA, 2015). Por esse motivo, os experimentos com variáveis que assumem valores inteiros, aconteceram. De maneira geral, os coeficientes μ e V com valores atribuídos de 1,1 e 0,9 respectivamente, cumpriram bem o seu papel, tanto no aspecto prático quanto no aspecto teórico de resolução.

É notável a diferença de solução da função objetivo entre os experimentos com variáveis contínuas e inteiras, entre a solução do *experimento 1* que é o experimento mais genérico de teste e o *experimento 4*, que revela um aumento de 48,6% em termos monetários, que é explicado pela restrição de que as variáveis sejam inteiras.

A diferença entre os experimentos 3 e 4 que são soluções factíveis em termos práticos, é o último número das casas decimais. O experimento 3 utilizou coeficientes contínuos e embora ele possa ser utilizado na prática uma vez que atendeu aos requisitos práticos de embalagem, o tempo de resolução foi de 607,23 segundos, o que pode não ser viável para a empresa pois na prática pode não existir todo este tempo disponível para processamento computacional, exigindo maior flexibilidade e eficiência por parte da modelagem e do computador (CAVALCANTI, 2021).

Por fim, o experimento 4 é o que indica ter melhor desempenho, unindo um bom desempenho prático pois atende aos requisitos de embalagens e com um tempo computacional baixo, de 0,453 segundos, um tempo considerado muito pequeno, mesmo para um problema relativamente grande como o apresentado. Os valores dos coeficientes escolhidos para o modelo mesmo sendo genéricos ou coletados em sistemas reais, podem dificultar a resolução do algoritmo, exigindo mais tempo ou mesmo não encontrando uma solução ótima (TELES, 2021).

Desta forma, os valores do volume e custo foram arredondados para cinco e com apenas duas casas decimais, o que uniu um bom desempenho de embalagem e uma boa aproximação para os valores utilizados no experimento 4.

Cabe ressaltar ainda que é imprescindível observar que as caixas α e ε na modelagem matemática A e E na linguagem de programação, não se mostraram vantajosas em nenhum dos experimentos, resultando em zero para todos os produtos e todos os centros. Isto significa que seu custo-benefício entre volume/custo é baixo, e que possivelmente a empresa deveria estudar um volume intermediário de caixa com um custo menor. Por outro lado, a caixa θ se mostrou com um bom

desempenho no custo/benefício de acordo com todos os experimentos, resultando em valores para todos os centros e com um valor total de 73 caixas para o sistema de embalagens do pedido.

A figura 6 ilustra a forma como são apresentados os resultados em ambiente de programação AMPL. A linha 2 dessa figura, exibe que foram consideradas para o problema, 57 restrições (rows). A linha 3, mostra a quantidade de variáveis (columns), como sendo 192. Finalmente, a linha 6, dessa figura revela o custo ótimo 185,1 reais obtido através do modelo matemático proposto para o sistema designador de embalagens via de programação matemática (AMPL). Vale ressaltar ainda, que os experimentos 3 e 4 se mostraram satisfatórios no modelo real, tendo as embalagens dos produtos sido realizado na prática com as embalagens e validando de fato o que havia sido proposto para o sistema designador de embalagem proposto na modelagem matemática, objeto de estudo desse trabalho.

```

1 Problem: testetcc
2 Rows: 57
3 Columns: 192 (192 integer, 0 binary)
4 Non-zeros: 576
5 Status: INTEGER OPTIMAL
6 Objective: Custo = 185.1 (MINimum)

```

Figura 6 - Resultado parcial da execução da rotina de programação no ambiente AMPL

Os resultados de algumas variáveis que são ilustrados no ambiente de programação AMPL conforme figura 7. A coluna No. (Column name) dessa figura se refere as variáveis e aos seus nomes, já na coluna Activity é referido ao valor final que a variável por exemplo. Como o é formulado com os índices i representando os produtos e j representando os centros fabris, significa que a restrição $f[1,2]$ se refere á caixa θ , ao produto 1 no centro fabril dois. Desta forma, a caixa deste tipo abrigou 11 produtos do tipo 1 no centro fabril de número 2.

No.	Row name	Activity	Lower bound	Upper bound
161	$f[1,1]$	7	0	
162	$f[1,2]$	11	0	
163	$f[1,3]$	12	0	
164	$f[1,4]$	3	0	
165	$f[2,1]$	0	0	
166	$f[2,2]$	5	0	
167	$f[2,3]$	0	0	
168	$f[2,4]$	1	0	
169	$f[3,1]$	3	0	
170	$f[3,2]$	6	0	
171	$f[3,3]$	3	0	

Figura 7 - Resultado parcial no ambiente de programação AMPL

Os resultados obtidos aliados a utilização do modelo matemático de um sistema designador de embalagens via programação matemática (AMPL) como uma alternativa de mensuração são considerados satisfatórios na medida em que cumpriram os objetivos inicialmente propostos e favoreceram o processo de melhoria contínua do sistema de embalagens cuja integração entre eficiência e sustentabilidade proposta nesse trabalho contemplam o desenvolvimento sustentável da cadeia de abastecimento numa perspectiva de uma economia circular em transição.

Além disso, o potencial impacto na eficiência resultante de uma abordagem sustentável da cadeia de abastecimento em termos de desenvolvimento ambiental, econômico e social adotado pela

empresa de tubulações plásticas, em questão, foi fundamental para economizar recursos, reduzir desperdícios, aperfeiçoar projetos de embalagens e, sobretudo, proporcionar vantagens competitivas.

5. Considerações finais.

Em tempos de globalização, aumentar o nível de competitividade nas empresas tem sido uma exigência crescente aos negócios para uma gestão empresarial eficaz apoiada no aperfeiçoamento de uma variedade de recursos. Neste contexto, a adoção de novas ferramentas e metodologias é fundamental para qualquer gestão empresarial orientar mudanças que contemplem ações de gerenciamento das operações do sistemas de embalagens mais eficientes em toda cadeia de abastecimento.

As ações desenvolvidas, no âmbito da melhoria contínua que envolvem o processo do sistema designador de embalagens proposto passaram pela realização de auditorias cujas medidas identificadas resultaram em soluções adaptadas que contribuíram para uma redução substancial dos desperdícios envolvidos nesse processo e obviamente, proporcionar melhorias do desempenho geral no gerenciamento das operações de embalagens da empresa de tubulações plásticas sob a ótica de eficiência e sustentabilidade.

O objetivo referente ao desenvolvimento de um modelo em linguagem de programação matemática AMPL proposto nesse trabalho foi alcançado obtendo um desempenho satisfatório, conforme descrito nas etapas anteriores. No entanto, algumas dificuldades foram encontradas em sua resolução, como a grande quantidade de variáveis e excessivo tempo de execução em alguns experimentos, dificuldades estas que afastam em alguns aspectos como uma “solução ótima” para o problema. O modelo matemático foi resolvido com variáveis inteiras que são factíveis, foi alcançado o objetivo de ser embalado na prática, porém, não atingiu a solução ótima de custo total, visto que os valores de volume e custo foram arredondados para que se obtivesse uma solução com um tempo computacional curto e que pudesse ser implementada.

O experimento que melhor atende aos parâmetros e sistemáticas reais e ao mesmo tempo mais flexível, resultou num custo total de embalagem de 185,1 reais. No contexto atual da problemática escolhida para o artigo, o valor utilizado para o embalar todos os itens é de cerca de 600 reais, pouco mais do que o triplo do valor encontrado no modelo matemático, no entanto, é importante lembrar que os produtos são embalados em lotes fixos e imutáveis, sistemática diferente da proposta por este artigo, que visa trabalhar com lotes flexíveis de produtos. Desta forma, o valor de 600 reais compreende além da quantidade de produtos indicados, algumas unidades a mais por conta dos lotes fixos.

De maneira geral, a ferramenta formulada pode se fazer útil para a organização utilizada como modelo dentro das premissas e justificativas expostas, bem como por pesquisadores e empresas que desejam soluções semelhantes buscadas por este trabalho.

A abordagem *Logística de Embalagem Sustentável* num contexto de uma economia circular (EC) em transição é considerada particularmente inovadora porque existe uma escassez de literatura que trate de embalagem, logística, projeto de produto e sustentabilidade, a partir de uma abordagem aplicada. Tal abordagem nos últimos anos têm contribuído ativamente para aumentar o desempenho geral do gerenciamento das operações em sistemas embalagens sob a ótica de eficiência e desenvolvimento sustentável.

Em síntese, a adoção da abordagem *Logística de Embalagem Sustentável* pode contribuir para um aumento na competitividade da cadeia de abastecimento através da implantação da sustentabilidade cujos alicerces dessa abordagem são a incorporação e a compreensão completa dos requisitos de projeto; implantação de uma estrutura organizacional adequada para o projeto de embalagens do ponto de vista abrangente (interna e externamente); e promoção da mudança bem como inovação nas embalagens para melhorar seu desempenho sustentável.

Não foi possível quantificar neste estudo os valores monetários (em R\$) concretos no que diz respeito a abordagem *Logística de Embalagem Sustentável* adotada nesse trabalho para o processo do sistema de embalagens proposto. No entanto, partindo de indicadores tanto da eficiência quanto do aspecto ambiental que envolve uma mudança de paradigma orientado para uma economia circular (EC) que exige cadeias de abastecimento cujo sistema de embalagem seja reciclável e que o projeto de embalagens para determinados produtos seja desenvolvido com o mínimo de material possível. Tais indicadores denotam melhorias para a empresa envolvida nesse trabalho que, seguramente, foram

decisivas na redução dos custos de embalagens e melhoria do desempenho da visão multifuncional *Logística de Embalagem Sustentável*.

Além disso, sabe-se ainda que a efetiva aplicação das metodologias de monitoramento do sistema de embalagem proposto à longo prazo poderá refletir-se numa maior e melhor organização da gestão operacional da cadeia de abastecimento da empresa envolvida com resultados bastante positivos. Assim, o monitoramento no que diz respeito a redução de custos e otimização do desempenho sustentável numa perspectiva sustentável e de adaptação contínua. Esse desenvolvimento sustentável, envolve substituição de embalagens de plástico por embalagens recicláveis de papelão.

Os resultados obtidos nesse trabalho indicam que o desenvolvimento adicional de muitas dessas melhores práticas organizacionais, contribuíram ativamente para aumentar o desempenho geral na gestão de embalagem. Tais resultados, são considerados satisfatórios na medida em que cumpriram os objetivos inicialmente propostos e favoreceram a melhoria do sistema designador no processo de embalagens com a correta aplicação dos recursos existentes na redução de custos.

O principal objetivo e questão de pesquisa desse trabalho é explorar em que medida a promoção e implementação das melhores práticas organizacionais em gerenciamento de sistemas de embalagens, enquadradas numa abordagem de *Logística de Embalagem Sustentável*. Tal abordagem contribui ativamente para a otimização da eficiência, redução de custos e melhoria do desempenho sustentável das cadeias de abastecimentos num contexto de modelos de economia circular em transição.

Os resultados obtidos nesse trabalho são fundamentais para o analista do sistema de embalagens proposto direcionar especial atenção à ligação embalagem logística x economia circular como uma relação sem precedentes numa perspectiva de desenvolvimento sustentável. Nesse contexto a embalagem é considerada como um vetor de extrema importância para favorecer a transição para a economia circular. Esses resultados, são considerados satisfatórios na medida em que cumpriram os objetivos inicialmente propostos e favoreceram o compromisso de melhoria contínua das operações do sistema logístico de embalagem da indústria envolvida.

É importante salientar ainda que a adoção de qualquer metodologia para o sistema de embalagens num cenário de transição para economia circular pressupõe uma escolha adequada de projetos de embalagem recicláveis de baixo custo e redução de operações, uma vez que a eficiência e o desempenho sustentável das cadeias de suprimentos dependem em parte destas escolhas.

As sugestões para trabalhos futuros estão alinhadas à pesquisa e possível aplicação de métodos mais eficazes neste sentido, pois utilizando algoritmos específicos de programação linear inteira, algoritmos genéticos ou métodos multicritérios, por exemplo. A linguagem de programação e a ferramenta solver utilizada também podem contribuir para uma solução mais aproximada, sendo implementados softwares e solver comercial IN, que podem gerar soluções mais aproximadas a ótica global.

Referências.

ABDUL-HAMID, A. Q., ALI, M. H., TSENG, M. L., LAN, S., & KUMAR, M. Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. *Computers & Operations Research*, 123, 105052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105052>

ABIDEEN, A. Z., PYEMAN, J., SUNDRAM, V. P. K., TSENG, M.-L., & SOROOHIAN, S. Leveraging capabilities of technology into a circular supply chain to build circular business models: A state-of-the-art systematic review. *Sustainability*, 13(16), 8997, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13168997>

ALKHUZAIM, L.; ZHU, Q.; SARKIS, J. Evaluating Emergy Analysis at the Nexus of Circular Economy and Sustainable Supply Chain Management. *Sustainable Production and Consumption*, v.25, 413-424, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550920313968>

BERG, A.; ANTIKAINEN, R.; HARTIKAINEN, E.; KAUPPI, S.; KAUTO, P.; LAZAREVIC, D.; PIESIK, S. and SAIKKU, L. Circular Economy for Sustainable Development, Reports of the Finnish environment, 26, 2018. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/251516/SYKEE_26_2018.pdf

BRAZ, A.C.; MELLO, A.M. Circular Economy supply network management: A complex adaptive system. *International Journal of Production Economics*, 243, 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108317>

CABRAL, A.C.D. Projetos de sistema de embalagem com a abordagem PLM. *Revista Embalagem & Tecnologia*, 10 -12, edição 22, Ano V, 2015. https://issuu.com/editora_casa_grande/docs/et22

CALZOLARI, T.; GENOVESE, A.; BRINT, A. Circular Economy indicators for supply Chains: A systematic literature review, *Environmental and Sustainability Indicators*, v.13, 1-19, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972721000611?via%3Dihub>

CAVALCANTI, L. B. Roteirização de rebocadores para atendimento de plataformas offshore, com operações sincronizadas e janelas de tempo. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; DE LIMA, E. P.; TURRIONI, J.B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; DA COSTA, S. E. G.; MARTINS, R. A.; SOUSA, R.; PUREZA, V. Metodologia da pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 244 p.

DOS SANTOS, P. A. V. H. Resolução do problema de carregamento de container e de roteamento de veículos utilizando algoritmos genéticos. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

DUCHARME, C. Modelagem e otimização do programa de manutenção de transformadores de potência. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Instituto Alberto Luiz de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2012.

FAHD, A.; FRED, L.; YING, Y. The Importance of Supply Chain Resilience: An Empirical Investigation. *Procedia Manufacturing*, 39 p. 1525–1529, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920303590>

FRACKOWIAK S.; LUDWICZAK, J.; LELUK, K. and KOZLOWSKI, M. New class of shear oriented, biodegradable packaging material. *Composites Part B: Engineering*, v.92, 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.036>

FULCONIS, F. and PHILIPP, B. Packaging et chaîne logistique en boucle fermée: contribution au passage d’une économie linéaire à une économie circulaire, *Logistique & Management*, vol. 24, n° 3, 4, 2016. <https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal-01449111/document>

GARCÍA-ARCA, J.; PRADO-PRADO, J.C.; GONZÁLEZ-PORTELA G. A.T. Packaging logistics: Promoting sustainable efficiency in supply chains. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* 44, 325–346, 2014. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJPDLM-05-2013-0112/full/html>

GARCÍA-ARCA, J.; PRADO-PRADO, J.C.; GONZÁLEZ-PORTELA G. A.T. Sustainable Packaging Logistics The link between Sustainability and Competitiveness. *Sustainability*, 9(7) 2017. <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1098>

GARCÍA-ARCA, J.; COMESAÑA-BENAVIDES, J.A.; GONZÁLEZ-PORTELA G. A.T. Methodology for selecting packaging alternatives: an “action research” application in the industrial sector. *Central European Journal of Operations Research*, 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10100-020-00724-3>

GOVINDAN, K. HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1-2),

278-311, 2018. http://www.samiagamoura.com/_media/group4-papersystematicreview.pdf

HELLSTRÖM, D. and OLSSON, A. Managing Packaging Design for Sustainable Development -A Compass for Strategic Directions, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.

HUANG, Y.; YING, Xu; SHAN, Qi; XIAOPING, F.; XIN, Y. Recent patents on RFID-based logistics management systems. Recent patents on Mechanical Engineering, 9(1) p.26–36, 2016. <https://www.eurekaselect.com/138485/article>

JOHANSEN, M.R.; THOMAS, J.; CHRISTENSEN, T.B.; RAMOS, T.M.; SYBERG, K. A review of the plastics value chain from a circular economy perspective. Journal of Environmental Management, Vol. 302, 1-9, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>

KOBERG, E.; LONGONI, A. A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. Journal Cleaner Production, v.207, 1084-1098, 2019. https://e-tarjome.com/storage/panel/fileuploads/2019-08-24/1566636996_E12809-e-tarjome.pdf

KURPEL, D. V.; SCHENEKEMBERG, C. D.; SCARPIN, C. T. Um modelo matemático exato para o problema de carregamento de contêineres com restrição de carregamento completo de grupos de itens. Revista eletrônica Gestão & Saúde, v.6, 1982-4785. p1014-26. 2015. <https://periodicos.unb.br/index.php/rgs/article/view/2843/2548>

LACHTERMACHER, G. Pesquisa Operacional na tomada de decisões. Quinta edição, São Paulo, GEN LTC, 2017.

LANARAS-MAMOUNIS, G.; KIPRITSIS, A.; TSALIS, T.A.; VATALIS, K.I.; NICOLAOU, I.E. A Framework for Assessing the Contribution of Firms to Circular Economy: a Triple-Level. Circular Economy and Sustainability, 1-20, 2022. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s43615-021-00144-8.pdf> 2022

LIU, Q., TREVISAN, A. H., YANG, M., & MASCARENHAS, J. A framework of digital technologies for the circular economy: Digital functions and mechanisms. Business Strategy and the Environment, p.1–22, 2022. <https://doi.org/10.1002/bse.3015>

LONGARAY, A. A. Introdução à Pesquisa Operacional. Primeira edição, São Paulo, Saraiva, 2013.

MARTINS, V.; ANHOLON, R.; QUELHAS, O.L.G. and Filho, W. “Sustainable Practices in Logistics Systems: An Overview of Companies in Brazil”, Sustainability, 11(15) p. 4140, 2019. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/15/4140/htm>

MEHERISHI, L. ; NARAYANA, S.A.; RANJANI, K.S. Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review. Journal of Cleaner Production, v.237, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.057>

MLALILA, N, KADAM, D.M., SWAI H., HILONGA, A. Transformation of food packaging from passive to innovative via nanotechnology: concepts and critiques. J. Food Sci Techno. V.53, 3395–3407, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2325-6>

MOURA, D.A. Logística portuária sustentável - uma análise de experiências internacionais. Produto & Produção, 22(3), 1-19, 2021. <https://seer.ufrgs.br/ProdutoProducao/article/view/109347/65003>

NEGRI, M.; CAGNO, E.; COLICCHIA, C.; SARKI, J. Integrating sustainability and resilience in the supply chain: A systematic literature review and a research agenda. Business Strategy and The Environment, p. 1-29, 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/bse.2776>

NIKOLAOU, I.E.; JONES, N.; STEFANAKIS, A. Circular Economy and Sustainability: the Past, the Present and the Future Directions. *Circ. Econ. Sust.* 1, 1–20, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s43615-021-00030-3>

NIKOLAOU, I.E. & SAGARAKIS, K.P. An introduction to circular economy and sustainability: Some existing lessons and future directions, *Sustainable Production and Consumption*, v.28, 600-608, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.06.017>

OLIVEIRA, E. V. Otimização do problema de corte bidimensional não guilhotinado usando meta-heurísticas especializadas. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 2018.

ORINDO, M. A. M. Planejamento da Expansão de sistemas de transmissão considerando o modelo CA e desligamento na operação de linhas de transmissão. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 2020.

PALSSON, H. *Packaging Logistics. Understanding and managing the economic and environmental impacts of packaging in supply chains*, Kogan Page, London, 2018.

PALSSON, H. and SANDBERG, E. Paradoxes in supply chains: a conceptual framework for packed products. *The International Journal of Logistics Management*, 31(3), 423-442, 2020.
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJLM-12-2019-0338/full/html>.

PEREIRA, D. & CAMARGO, R. PIFOP: uma aplicação WEB para desenvolvimento colaborativo de modelos matemáticos em AMPL. *Pesquisa Operacional para o desenvolvimento*, vol.14, p.1-15, 2021.
<https://www.podesenvolvimento.org.br/podesenvolvimento/article/view/651/448>

PEREIRA, R.S.C. O Sistema de Economia Circular e a Agenda 2030: Análise da Evolução em Portugal. *E³-Revista de Economia, Empresas e Empreendedores na CPLP*, 7(2), 96-124, 2021.
<https://revistas.ponteditora.org/index.php/e3/article/view/381/317>

RAGSDALE, Cliff T. *Modelagem de planilha e análise de decisão: Uma introdução prática a business analytics*. Oitava edição. São Paulo: Cengage Learning, 2021.

REGATTIERI, A.; ZIJM, H.; KLUMPP, M. and HERAGU, S. *Operations, Logistics and Supply Chain Management, Lecture Notes in Logistics*, series editors, Springer, Singapore, 2019.

REZENDE, L. V. Métodos heurísticos para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em uma indústria siderúrgica. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

RICARDO, C.C.; ALVES, C.C.; HENNING, E. & WENDT, S.L. Processo de automatização de uma fresadora: um estudo de melhoria contínua baseado na metodologia do ciclo PDCA. *E-Tech: Tecnologia para competitividade industrial*, v.6, N.1, p.1-20, Florianópolis, 2013.
<https://doi.org/10.18624/e-tech.v6i1.331>

RODRÍGUEZ-ANTÓN, J.M.; RUBIO-ANDRADA, M.S.; CELEMÍN-PEDROCHE; ALONSO-ALMEIDA, M.D.M. Analysis of the relations between circular economy and sustainable development goals. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26 (8), 708-720, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/335966505_Analysis_of_the_relations_between_circular_economy_and_sustainable_development_goals

SANDGERG, E. & HULTBERG, E. Dynamic capabilities for the scaling of circular business model initiatives in the fashion industry, *Journal of Cleaner*, v.320, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128831>

SILLANPÄÄ, M.; NCIBI, C. The Circular Economy - Case Studies about the transition from the linear Economy, Elsevier: Academic Press, Lut University, Finland, 2019.

SOHRABPOUR, V.; OGHAZI, P.; OLSSOM, A. An Improved Supplier Driven Packaging Design and Development Method for Supply Chain Efficiency. Packag. Technol. Sci., v.29, 161–173, 2016. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pts.2194>

SUÁREZ-EIROA, B.; FERNANDES, E.; MÉNDES-MARTÍNEZ, G.; SOTO-OÑATE, D. Operational principles of circular economy for sustainable development: Linking theory and practice. Journal of Cleaner Production, vol. 214, p.952-961, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.271> .

STEFANAKIS, A; NIKOLAOU, I. Circular Economy and Sustainability - Management and Policy, vol. 1, Elsevier Publications, Technical University of Crete, Greece, 2022.

TAHA, H. A. Pesquisa Operacional. Oitava edição, São Paulo, Pearson, 2015.

TELES, R. A. De O. Aplicação de ferramentas de otimização para o corte de barras de aço para concreto armado. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

VEGTER, D.; HILLEGERSBERG, J.; OLTHAAR, M. Supply chains in circular business models: processes and performance objectives. Resources, Conservation and Recycling, v.162, 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105046>

ZOU Z.; CHEN, Q.; UYSAL, I.; ZHENG, L. Radio frequency identification enabled wireless sensing for intelligent food logistics. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1-16, 2014. <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2013.0313>