




PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA NA INDÚSTRIA E SUAS CONEXÕES COM OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA

LINEAR PROGRAMMING APPLIED IN INDUSTRY AND ITS CONNECTIONS WITH THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS: A BIBLIOMETRIC AND SYSTEMATIC REVIEW

Anderson Hoose*  E-mail: andersonhoose@upf.br

Moacir Kripka*  E-mail: mkripka@upf.br

*Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, Brazil.

Resumo: Vários problemas do mundo real podem ser modelados com o uso da Programação Linear, dentre eles, os temas voltados para a sua aplicação na indústria. Neste contexto, este estudo tem como objetivo identificar as aplicações da Programação Linear na Indústria e suas conexões com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A metodologia utilizada é uma análise sistemática e bibliométrica de artigos científicos indexados na base de dados Scopus, considerando a aplicação da programação linear na indústria. Também foram pesquisados os desafios, aspectos positivos e negativos, perspectivas e oportunidades no uso da programação linear e a sua conexão com os objetivos de desenvolvimento sustentável. O estudo foi composto pela análise de 136 artigos, referente ao período de 2000 até julho de 2023. Foram gerados mapas temáticos com o uso do Bibliometrix, para orientar as discussões da pesquisa. Constatou-se que é possível a aplicação da formulação de problemas da programação linear em várias atividades na indústria, nos assuntos de mão de obra, redução de estoque e atendimento da demanda. O maior desafio está na formulação de problemas que abrangem os aspectos da sustentabilidade, principalmente no uso da energia renovável e o impacto ambiental, que também são temas-motores neste campo de pesquisa.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Impacto ambiental. Agenda 2030. Eficiência Energética. Programação linear.

Abstract: Several real-world problems can be modeled using Linear Programming, among them, themes related to its application in industry. In this context, this study aims to identify the applications of Linear Programming in Industry and its connections with the Sustainable Development Goals (SDGs). The methodology used is a systematic and bibliometric analysis of scientific articles indexed in the Scopus database, considering the application of linear programming in industry. The challenges, positive and negative aspects, perspectives and opportunities in the use of linear programming and its connection with the goals of sustainable development were also researched. The study consisted of the analysis of 136 articles, referring to the period from 2000 to July 2023. Thematic maps were generated using the Bibliometrix, to guide the research discussions. It appears that it is possible to apply the formulation of linear programming problems in various activities in industry, in matters of labor, inventory reduction and demand fulfillment. The biggest challenge is in the formulation of problems that encompass aspects of sustainability, mainly in the use of renewable energy and the environmental impact, which are also driving themes in this field of research.

Keywords: Sustainability. Environmental Impact. 2030 Agenda. Energy Efficiency. Linear Programming.

1 INTRODUÇÃO

A Programação Linear (PL) teve sua origem por volta de 1950, quando o termo “programação” era utilizado no contexto militar, referindo-se a cronogramas de treinamento e logística de fornecimento. O termo “linear” dizia respeito a planos viáveis que apresentavam restrições, podendo ser também medido o seu custo. Hoje em dia, a PL é aplicada em diversas áreas econômicas, como: transportes, indústria, agricultura, preços das matérias-primas e produtos finais, entre outras (Matoušek; Gärtner, 2007; Vanderbei, 2020).

Muitos problemas do mundo real podem ser modelados com o uso da PL, no entanto, há casos em que as variáveis estão restritas à números inteiros, denominados de Programação Linear Inteira (PLI). Além disso, existem situações em que as variáveis podem assumir valores reais, caracterizando a Programação Linear Inteira Mista (PLIM) (Vanderbei, 2020). Como exemplos da PLIM, podem ser citados: a aplicação para os limites de tempo na cadeia de suprimentos, o suporte ao planejamento da capacidade produtiva, o sequenciamento de produtos e quantidade de pessoal em linhas de montagem paralelas (Gamrath *et al.*, 2019; Huka *et al.*, 2021).

Diversas pesquisas ressaltam a importância da aplicação da PL na minimização dos impactos ambientais, com foco em substituição de combustíveis fósseis e adoção de energias renováveis (Barbosa; Gomes, 2015; Choi; Ahn; Choi, 2020; Hagspiel *et al.*, 2014). Há uma crescente preocupação em equilibrar os três pilares da sustentabilidade, refletida nas políticas ambientais mais rigorosas e no aumento da consciência social (Vallerio *et al.*, 2015).

Outros estudos publicados, também destacam o papel fundamental da PL na otimização de processos industriais, permitindo uma alocação eficiente de recursos e uma melhor gestão de operações, conforme Gassen *et al.* (2019), destaca a capacidade da PL em oferecer soluções práticas para desafios operacionais complexos, promovendo a maximização das margens de contribuição dos produtos

e observando as restrições de capacidade produtiva e atendimento de demanda. Além disso, Santos, Souza Junior e Bouzada (2012), enfatizam a importância da PLI como ferramenta para a obtenção da configuração ótima de carga e de trajeto da frota de caminhões, ao menor custo de distribuição, visando ao atendimento da demanda programada.

A capacidade da PL de modelar e analisar cenários diversos contribui para a formulação de estratégias que buscam o equilíbrio entre metas econômicas e ambientais, corroborando para a sua importância como uma abordagem indispensável para otimizar processos e enfrentar os desafios contemporâneos.

Neste contexto, considerando a relevância na aplicação da PL na indústria e sua interseção com a sustentabilidade, este estudo tem como objetivo avaliar os desafios na aplicação da Programação Linear na indústria e suas conexões com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Entre os objetivos específicos: i) apresentar os aspectos positivos e negativos das aplicações relacionadas aos objetivos do desenvolvimento sustentável; ii) apresentar as perspectivas e oportunidades a área da programação linear. A principal contribuição desta revisão é a discussão das lacunas e das possibilidades da aplicação da PL, considerando as questões de sustentabilidade e o impacto das atividades, sobretudo industriais.

2 METODOLOGIA

O estudo consiste em uma revisão bibliométrica para apresentar o cenário do estado atual do conhecimento sobre a aplicação da programação linear na indústria, com base em uma revisão do “estado da arte”. A metodologia teve como referência o estudo realizado por Nazari *et al.* (2020), que empregou métodos de revisão bibliométrica e sistemática. Isso permitiu a identificação de um histórico de pesquisas relacionadas ao tema, sua aplicação na indústria e o reconhecimento de tendências na área. O estudo responde as seguintes questões de pesquisa:

- a) Quais são as aplicações com o uso da programação linear na indústria que abrangem: horas de trabalho, lucratividade e produtividade?
- b) Quais são os desafios observados na aplicação da programação linear na indústria?

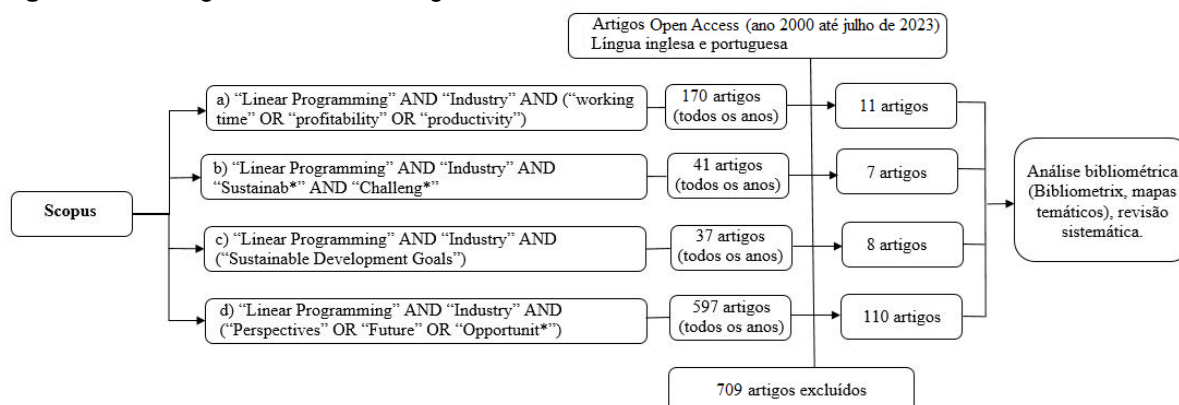
c) Quais os aspectos positivos e negativos de trabalhar os objetivos do desenvolvimento sustentável na indústria com a aplicação da programação linear?

d) Quais são as perspectivas, as oportunidades e o futuro na aplicação da programação linear na indústria?

Foi empregada a base de dados da Scopus (www-scopus.ez116.periodicos.capes.gov.br) para a condução da revisão, visto que plataforma contém um maior número de publicações relacionadas às palavras-chaves pesquisadas. Na seleção dos artigos, foram incluídos na base de dados Scopus os seguintes termos de busca: (a) “*Linear Programming*” AND “*Industry*” AND (“*working time*” OR “*profitability*” OR “*productivity*”); (b) “*Linear Programming*” AND “*Industry*” AND “*Sustainab**” AND “*Challeng**”; (c) “*Linear Programming*” AND “*Industry*” AND (“*Sustainable Development Goals*”); (d) “*Linear Programming*” AND “*Industry*” AND (“*Perspectives*” OR “*Future*” OR “*Opportunit**”). Para localizar os termos de interesse no título, resumo e palavras-chaves, foram utilizados operadores booleanos. O período de pesquisa foi restrito de 2000 até julho de 2023.

Foi conduzida uma análise de conteúdo e bibliométrica nos artigos localizados na base de dados, sendo elaborados mapas temáticos gerados pelo Bibliometrix (www.bibliometrix.org/), para orientar as discussões da pesquisa. O Fluxograma da aplicação da metodologia está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

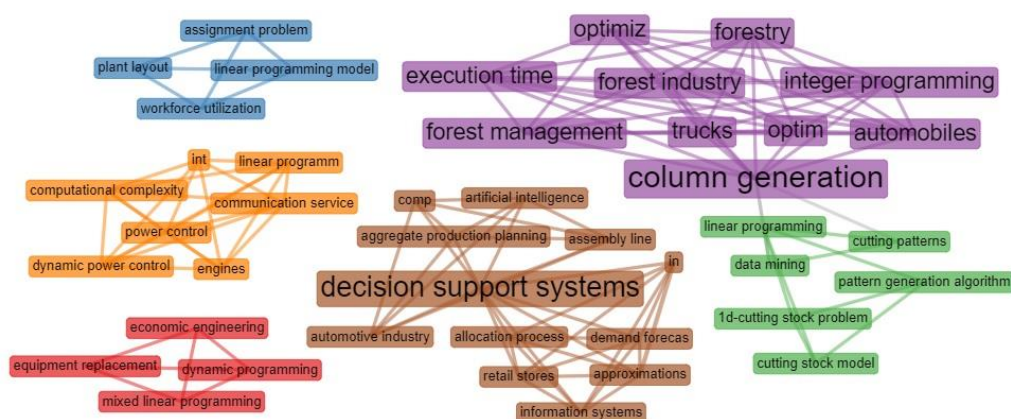
O próximo capítulo, de resultados e discussão, foi dividido em subcapítulos, cada um destinado a responder uma das questões de pesquisa definidas na metodologia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Aplicações da programação linear na indústria

Nos artigos pesquisados, as aplicações da PL na indústria podem ser agrupadas em seis grupos, apresentados na Figura 2. Os estudos explorados nessa pesquisa buscaram melhorar a utilização das horas de trabalho, produtividade e lucratividade.

Figura 2 – Aplicação da PL na indústria



Fonte: Elaborado pelos autores com uso do Bibliometrix (2023).

A Programação Linear (PL) tem sido aplicada em diversas áreas industriais ao longo dos anos. No estudo de Ogunranti e Oluleye (2016), na indústria madeireira, a PL é empregada para minimizar os desperdícios do corte de madeira e reduzir os níveis de estoque. Em seguida, Azlan *et al.* (2019) destacam sua aplicação na indústria automotiva, com o objetivo de aumentar a produtividade dos funcionários. Posteriormente, Hoogeveen, Tomczyk e Van der Zanden (2019) discutem o uso da PL na indústria de flores, onde ela é utilizada para determinar a quantidade de plantas-mãe necessárias para atender à demanda de mudas. Finalmente, no estudo de Shi *et al.* (2017) sobre transporte na indústria de

mineração, a PL é aplicada para melhorar a comunicação entre as locomotivas de minas e os pontos de acesso nas laterais dos túneis.

A PLI foi aplicada em uma rede de conexão de provedores de serviços, com o objetivo de minimizar os custos e obter uma boa disponibilidade dos serviços (Kamal; Member; Al-Kofahi, 2011). Em outro estudo, Rey, Muñoz e Weintraub (2009) aplicaram a programação de caminhões para o transporte de toras de madeira, com o intuito de minimizar os custos associados ao transporte entre serrarias, fábricas de celulose e portos.

Os estudos realizados com o uso da PLIM, apresentam diversas aplicações em distintos setores industriais. Gebennini *et al.* (2016) demonstraram sua utilização em uma indústria de plásticos, visando minimizar as distâncias percorridas pelos operadores. Em um contexto automotivo, Sillekens, Koberstein e Suhl (2011) formularam um problema para o planejamento de produção agregado, buscando flexibilizar a mão de obra e adaptar-se a mudanças nos custos e carga de trabalho dos operadores.

Referente à análise de viabilidade, Abensur (2015) explorou a substituição de veículos antigos por novos, considerando dados reais do mercado de automóveis. Corominas, Lusa e Pastor (2004) direcionaram sua pesquisa para a indústria de serviços, concentrando-se no planejamento da jornada de trabalho para flexibilizar a carga horária da mão de obra. Por fim, Caro e Gallien (2010) abordaram a gestão de estoque em uma rede de lojas de varejo, onde a PLIM foi utilizada para adequar o tamanho do estoque, maximizando as vendas sob restrição de disponibilidade. Esses estudos refletem a ampla aplicabilidade da PLIM na otimização de diferentes processos empresariais.

Nos estudos também foram elaborados modelos matemáticos para auxiliar na programação de viagens dos caminhões enfrentando o desafio do atendimento da demanda de flores (Hoogeveen; Tomczyk; Van Der Zanden, 2019; Ogunranti; Oluleye, 2016; Rey; Muñoz; Weintraub, 2009). Outro estudo na indústria automotiva inovou ao embutir técnicas e pré-processamento em um sistema de suporte à decisão. Essa abordagem integrada permitiu a sincronização eficiente entre o

planejamento da capacidade de produção e o planejamento da força de trabalho (Sillekens; Koberstein; Suhl, 2011).

Na análise de substituição de máquinas e equipamentos na indústria, a formulação matemática do problema de programação linear contribuiu como suporte na tomada de decisão, para saber o momento ideal para a troca (Abensur, 2015).

Estudos recentes nas indústrias automotiva, de plásticos e de serviços, conduzidos por autores como Azlan *et al.* (2019), Corominas, Lusa e Pastor (2004), Gebennini *et al.* (2016) e Sillekens, Koberstein e Suhl (2011), focalizaram a otimização da alocação e distribuição da mão de obra. Essas pesquisas visaram aprimorar a produtividade dos operadores e otimizar as horas trabalhadas, explorando estratégias que impactam positivamente o desempenho operacional e as condições de trabalho em diferentes contextos industriais. Os estudos melhoraram a estimativa de férias dos operadores com a alocação dos funcionários para as equipes de: custos, qualidade, entrega e controle de especificação e certificação. A melhoria nas horas trabalhadas também afetou a produtividade dos trabalhadores.

Para atender a demanda da indústria de serviços, foram realizados estudos para reduzir os desperdícios, reduzir os estoques e custos de operação, conforme Caro and Gallien (2010), Hoogeveen *et al.* (2019), Ogunranti e Oluleye (2016) e Rey *et al.* (2009), neste sentido reduzir os desperdícios e custos de operação são importantes para melhorar a produtividade e obter lucratividade, uma vez que a demanda é atendida.

Os trabalhos que abrangem o uso dos ativos na indústria, bens móveis e imóveis, sua substituição e melhoria, foram conduzidos buscando a redução dos tempos de manutenção e redução de falhas dos componentes gerando maior tempo de trabalho, refletindo na melhoria da produtividade (Abensur, 2015; Kamal; Member; Al-Kofahi, 2011; Shi *et al.*, 2017).

Diante da crescente demanda por eficiência e produtividade, a próxima seção explorará de forma mais aprofundada os desafios na aplicação da Programação Linear, oferecendo *insights* valiosos para enfrentar as complexidades operacionais e maximizar os benefícios dessa abordagem na indústria.

conforme constatado por (Sprong *et al.*, 2019). Esse cenário destaca a relevância de práticas mais eficientes na cadeia alimentar para mitigar os efeitos adversos sobre o meio ambiente.

Em uma perspectiva global, Font Vivanco, Wang e Hertwich (2018) apontam um vínculo robusto no uso da água, terra e energia, ressaltando o desafio essencial de antecipar as consequências do consumo desses recursos naturais limitados, no qual será necessário a implementação de estratégias que promovam a preservação ambiental (Font Vivanco; Wang; Hertwich, 2018). No mercado de energia elétrica, destaca-se a pressão para a redução de CO₂ na Europa, na qual será preciso prever e equilibrar eficientemente a capacidade de armazenamento com o aproveitamento de energias renováveis (Hagspiel *et al.*, 2014).

Na indústria de manufatura percebe-se a redução nas margens de lucro, devido aumento na consciência social e maior rigidez das políticas ambientais. Esses três aspectos são conflitantes entre si. Neste sentido, as decisões tomadas pelas organizações exigem maiores responsabilidades e contrapartidas. A preocupação está em obter um modelo que consiga melhorar os processos produtivos e atender de forma satisfatória os três pilares da sustentabilidade: meio ambiente, econômico e social (Vallerio *et al.*, 2015).

Percebe-se que alguns objetivos trabalhados na programação linear são não lineares nos aspectos que abrangem a sustentabilidade. Assim, a obtenção de uma maior lucratividade pode ter consequências negativas nos aspectos sociais e ambientais. Por outro lado, o uso de tecnologias contribui na eliminação dos desperdícios nos alimentos, agrega qualidade e reduz o custo de produção (Descamps *et al.*, 2014; Vallerio *et al.*, 2015; Sprong *et al.*, 2019).

Quanto à utilização dos recursos da água, energia e terra, estão intrinsecamente interligados na economia global. Nos Estados Unidos e na China, a água e energia estão diretamente ligadas ao consumo de eletricidade e carvão nas cadeias de abastecimento das indústrias. O uso da terra tem uma relação muito forte com a agricultura e a produção de carnes na indústria de alimentos. A intensificação no uso de metais e minerais tem sido liderado pela China, especialmente na indústria da construção civil (Font Vivanco; Wang; Hertwich, 2018).

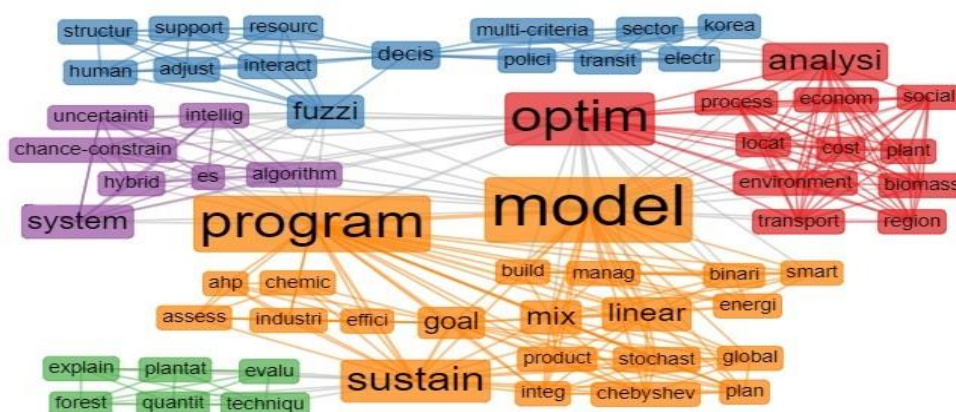
Este cenário destaca a complexidade e interdependência dos recursos na dinâmica econômica global. A eficaz gestão desses recursos torna-se imperativa para o setor industrial, impactando diretamente na produção e consumo responsáveis, acesso à água limpa, energia acessível e ação climática. Diante disto, o próximo subcapítulo vai descrever a relação dos ODS com a indústria, visando uma compreensão maior dessas interconexões.

3.3 A indústria e a relação com os ODS

Os artigos pesquisados sobre a indústria e a relação com os ODS abrangem diversos setores, incluindo a indústria química, o setor de produção da indústria têxtil, no setor de eletricidade na Coreia, o sistema de gerenciamento de energia elétrica em um edifício inteligente, o custo do transporte de biomassa entre indústrias, um algoritmo híbrido envolvendo o PIB e a estrutura da indústria, plantações de eucaliptos e fábricas de celulose, além do planejamento de recursos humanos em organizações (Barbosa; Gomes, 2015; Choi; Ahn; Choi, 2020; Diaz-Balteiro *Et al.*, 2016; Foroozandeh *et al.*, 2020; Ko *et al.*, 2019; Rausch; Stumpf, 2018; Song; Zhang; Cao, 2016; Wang; Nhieu; Tran, 2021).

Nos artigos, a relação da indústria com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), referente ao uso da Programação Linear, está abrangida por cinco grupos, apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Relação da indústria com os ODS e uso da PL



Fonte: Elaborado pelos autores com uso do Bibliometrix (2023).

Na indústria química brasileira foram avaliados os indicadores abrangentes, incluindo segurança ocupacional, processos industriais e aspectos ambientais, como: classificação dos resíduos, captação da água, águas residuais e tratamento, emissões de dióxido de carbono, consumo de gás natural, óleo, carvão e energia consumida (Barbosa; Gomes, 2015).

No setor de eletricidade da Coreia, as fontes de energia renovável têm uma significativa aceitação social, ao passo que a energia nuclear e fóssil enfrentam baixa aceitação social. A implementação de fontes renováveis, embora demande extensas áreas de terra, emerge como uma estratégia que contribui para a redução das emissões de poluentes (Choi; Ahn; Choi, 2020). Nas fábricas de celulose, o eucalipto se destaca como uma fonte renovável tripla, atuando como: fonte de energia, matéria-prima e geradora de renda para os plantadores (Diaz-Balteiro *et al.*, 2016).

No transporte de biomassa entre plantas industriais, observa-se que o aumento da distância percorrida acarreta em maiores custos de transporte e emissões de poluentes. A abordagem ideal seria a instalação das fábricas em proximidade às fontes de biomassa, embora seja desaconselhada a sua instalação junto às florestas. As longas distâncias impactam negativamente o custo do transporte, o consumo de combustíveis e as emissões de poluentes. Recomenda-se a condução de estudos futuros para avaliar a geração de empregos e considerar cuidadosamente os custos e benefícios envolvidos (Ko *et al.*, 2019).

No planejamento de recursos humanos nas organizações, um estudo incorporou ao seu modelo o tempo de treinamento dos funcionários e a realocação interna dos postos de níveis inferiores. Essa abordagem visa a alocação de indivíduos que atendam aos requisitos de treinamento e níveis hierárquicos específicos, contribuindo para o aprimoramento do planejamento de recursos humanos no setor público quanto na indústria (Rausch; Stumpf, 2018).

Outro estudo enfatiza que o crescimento econômico, ao estimular a demanda por energia, promove o crescimento de recursos humanos, materiais e financeiros, impulsionando o progresso e os investimentos tecnológicos. No entanto, é reconhecido que o crescimento econômico pode gerar conflitos com o meio

ambiente. A exploração excessiva de energia degradam o meio ambiente, gerando: águas residuais, resíduos sólidos, emissão de gases, prejudicando a saúde humana (Song; Zhang; Cao, 2016). Adicionalmente, o investimento em edifícios inteligentes é identificado como uma contribuição para a sustentabilidade, resultando na redução dos custos associados ao consumo da energia elétrica (Foroozandeh *et al.*, 2020).

No planejamento da produção no setor têxtil, é necessário manter a eficiência da produção, mesmo em condições de incerteza, e atender aos requisitos do desenvolvimento sustentável. Esses fatores estão associados à maximização dos lucros, à minimização das variações de emprego, à redução das emissões de poluentes, à maximização do tempo de operação das máquinas e à obtenção da satisfação do cliente (Wang; Nhieu; Tran, 2021).

Na Tabela 1 destaca-se a conexão entre os ODS, as indústrias e as atividades com a aplicação da PL. Observa-se que o ODS7 (energia limpa e acessível) representa o item onde a indústria mais atua ou pretende atuar de forma positiva, substituindo as fontes de energia fóssil por energia renovável (Barbosa; Gomes, 2015; Choi; Ahn; Choi, 2020). Em segundo lugar está o ODS1 (erradicação da pobreza) contribuindo no fomento de atividades como a plantação de eucaliptos para abastecer a indústria de celulose, o transporte de biomassa para a indústria e a criação de emprego com o crescimento da economia (Diaz-Balteiro *et al.*, 2016; Ko *et al.*, 2019).

Tabela 1 - Relação dos ODS com a indústria

Indústrias e Atividades	Objetivos do desenvolvimento sustentável																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Indústria Química																	
Eletricidade																	
Celulose																	
Construção																	
Transporte																	
Recursos Humanos																	
PIB e Indústria																	
Têxtil																	

Relação positiva ■ Relação negativa ■

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos artigos pesquisados (2023).

Em terceiro lugar, destaca-se o ODS13 (ação contra a mudança global do clima), com a redução de emissão de poluentes e menores distâncias percorridas no transporte (Ko *et al.*, 2019). No entanto, é importante ressaltar que o aumento no Produto Interno Bruto (PIB) tende a gerar maior atividade na indústria, o que pode resultar em uma emissão mais significativa de poluentes. Além disso, as preocupações em relação às possíveis recessões econômicas podem comprometer a renda da sociedade, impactando negativamente o ODS3 (saúde e bem-estar) abrangendo o aspecto social (Song; Zhang; Cao, 2016).

O ODS12 (consumo e produção responsáveis) apresenta como aspecto positivo a localização de unidades de plantações de eucalipto em áreas onde não haja degradação das florestas nativas. Destaca-se também o cuidado do setor têxtil em trabalhar de forma sustentável (Diaz-Balteiro *et al.*, 2016; Wang; Nhieu; Tran, 2021).

O ODS15 (vida terrestre) é caracterizado pela maior quantidade de conexões negativas. As atividades industriais, como a produção de energia renovável, as plantações de eucaliptos, as unidades de transporte de biomassa e a instalação de novas fábricas, dependem do uso da terra para sua localização. Esse crescimento econômico resulta na ocupação de áreas de terra, impactando diretamente o habitat dos animais (Choi; Ahn; Choi, 2020). Além disso, há a preocupação relacionadas aos resíduos lançados nas águas e à captação da água para as atividades industriais, estabelecendo conexões com o ODS6 (água potável e saneamento) (Barbosa; Gomes, 2015; Song; Zhang; Cao, 2016).

No âmbito na área de recursos humanos, destacam-se aspectos positivos relacionados ao treinamento de funcionários e à realocação de pessoas para postos de trabalho melhores, baseando-se em capacitação e hierarquia. Essas práticas promovem os ODS4 (qualidade na educação) e ODS5 (igualdade de gênero), contribuindo para um ambiente de trabalho saudável, alinhado com os ODS3 (saúde e bem-estar) e ODS8 (trabalho decente e crescimento econômico) (Diaz-Balteiro *et al.*, 2016; Ko *et al.*, 2019; Rausch; Stumpf, 2018).

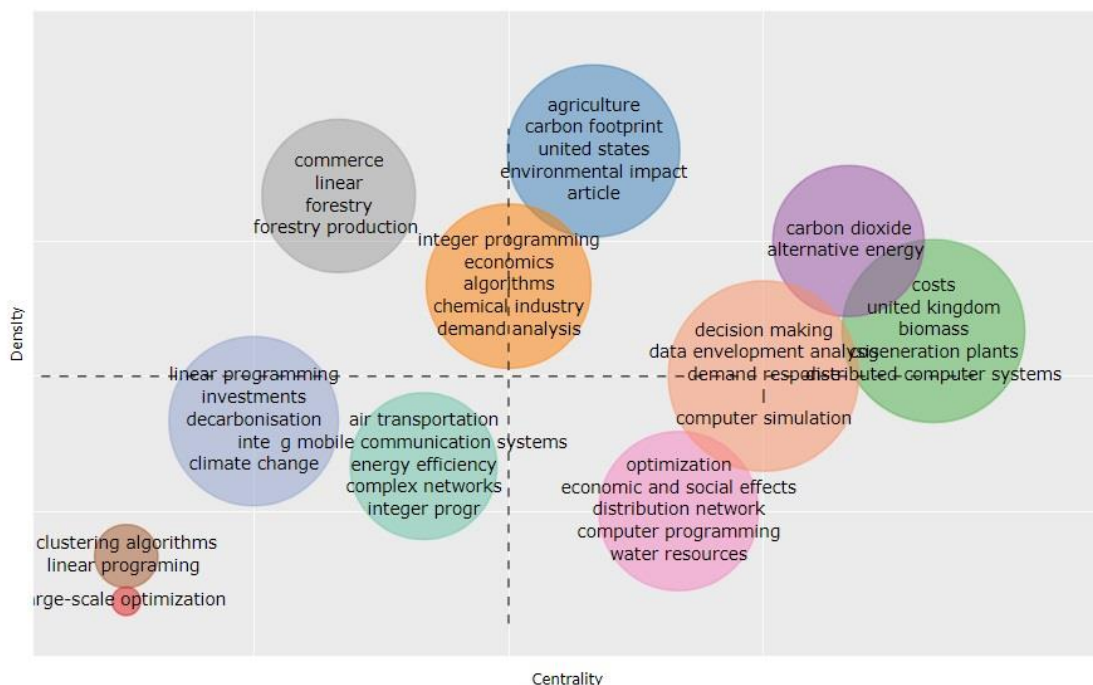
A atividade da indústria da construção, especialmente em projetos de edifícios inteligentes, apresenta uma associação positiva com o ODS11 (cidades e comunidades sustentáveis). Além disso, observa-se que o ODS9 (indústria, inovação e infraestrutura) está mais intimamente relacionado ao setor de eletricidade que busca desenvolver tecnologias para substituir a geração de energia atualmente baseada em usinas e recursos fósseis (Choi; Ahn; Choi, 2020).

Neste sentido, a integração das práticas sustentáveis nas diversas indústrias e a influência positiva em direção aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), delineia perspectivas e oportunidades significativas na aplicação da programação linear, que são apresentadas no próximo subcapítulo.

3.4 Perspectivas e oportunidades na aplicação da programação linear

As perspectivas e oportunidades na aplicação da programação linear estão representadas na Figura 5, no formato de um mapa temático de densidade e centralidade. Os temas estão agrupados em quatro quadrantes.

Figura 5 – Densidade e centralidade dos principais temas da PL



Fonte: Elaborado pelos autores com uso do Bibliometrix (2023).

No quadrante inferior esquerdo os temas são marginais e pouco desenvolvidos, apresentando baixa densidade e baixa centralidade. São temas emergentes ou desaparecidos (Cobo *et al.*, 2011). Os temas emergentes são: *decarbonisation*, *climate change*, *5G mobile networks* e *energy efficiency*.

Os estudos mais recentes sobre os desafios do uso da PL concentram-se na busca pela sustentabilidade no uso dos recursos naturais, por serem recursos limitados. Um dos objetivos está relacionado às estratégias de investimento para a redução das emissões de carbono em uma rede de supermercados (AYOUB *et al.*, 2019). Outra área de foco é a redução das emissões de gases poluentes e o aprimoramento da eficiência energética na indústria de alimentos, demandando uma reformulação de políticas dentro desse setor (Gowreesunker; Tassou; Atuonwu, 2018). Além disso, os estudos também exploram a substituição de caldeiras por eletricidade no aquecimento residencial (Vijay; Hawkes, 2017).

As mudanças climáticas têm sido objeto de estudo no âmbito do manejo agrícola, envolvendo variáveis como mão de obra, maquinário, fertilizantes e uso de terras, considerando os períodos de chuvas e secas (Nidumolu *et al.*, 2016). Outro aspecto relevante é o uso de biocombustíveis no maquinário agrícola, uma prática que tende a reduzir a emissão de poluentes (Glithero; Ramsden; Wilson, 2012). Também se destaca a avaliação do ciclo de vida dos produtos agrícolas e a qualidade alimentar dos consumidores com base na dieta alimentar e nutricional (Mcauliffe; Takahashi; Lee, 2020). Além disso, a eficiência energética e alocação ideal de recursos em redes móveis 5G, têm sido foco de estudos para reduzir o consumo de energia, emissão de poluentes e gastos operacionais (Fendt *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2018).

Os temas no quadrante inferior direito não são desenvolvidos, mas são importantes para o campo de pesquisa. São temas transversais e gerais, básicos (Cobo *et al.*, 2011). Os mais importantes são: *economic e social effects* e o *water resources*, associados aos aspectos da sustentabilidade.

A classificação da indústria quanto ao consumo dos recursos naturais, evidencia vínculos mais fortes relacionados no consumo da água, energia e terra

(Font Vivanco; Wang; Hertwich, 2018). Já em relação aos investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e às políticas governamentais, o estudo indica que, apesar dos elevados investimentos em P&D, persiste um desalinhamento em relação às áreas dos ambientes sociais e de sustentabilidade (Di, 2021). No âmbito da produção de etanol, são realizadas avaliações de viabilidade econômica e ambiental no uso de fontes de biomassa, visando minimizar o custo de produção e as emissões de CO₂ e o uso excessivo de água (Kantas; Cobuloglu; Büyüktaktan, 2015).

No quadrante superior esquerdo estão os temas muito especializados e de caráter periférico. Esses temas, têm laços internos bem desenvolvidos, mas laços externos sem importância. São considerados de importância marginal para o campo de pesquisa (Cobo *et al.*, 2011). Esses temas são: *forestry* e *forestry production*, estudos no uso de biomassas como palha de cereais. Ainda, foram realizados estudos na indústria da celulose, no impacto da mudança de preço da energia no planejamento da produção e na cadeia de suprimentos (Waldemarsson; Lidestam; Karlsson, 2017).

No quadrante superior direito estão temas bem desenvolvidos e importantes para a estruturação do campo de pesquisa. São os temas-motores da especialidade, tem forte centralidade e alta densidade (Cobo *et al.*, 2011). Esses temas são: *carbon dioxide*, *alternative energy*, *carbono footprint*, *environmental impact* e *costs*. O dióxido de carbono consta em estudos que visam reduzir a emissão de gases do efeito estufa, onde se busca converter o CO₂ em metanol, avaliando benefícios econômicos e ambientais (González-Aparicio *et al.*, 2017).

No contexto das energias alternativas e redução de custos na África Subsaariana, o óleo de dendê destaca-se como a oleaginosa que apresenta menores custos para a produção do biodiesel, enquanto a cultura do pinhão contribui significativamente para a geração de empregos (Ianda *et al.*, 2020). Na Associação das Nações do Sudeste Asiático, estudos de simulação sobre a demanda e o fornecimento de energia elétrica visam o desenvolvimento de novas capacidades energéticas (Chang; LI, 2013). A indústria do papel, por sua vez, enfrenta desafios relacionados à dependência de insumos e à reação nos preços

das matérias-primas utilizadas na geração de energia, incentivando a busca por tecnologias alternativas de produção (Schoepf; Weibelzahl; Nowka, 2018).

No sul dos Estados Unidos, estudos focados nos impactos ambientais do uso de resíduos de madeira e biomassa visam à geração de empregos, atendimento da demanda e implementação de sistemas integrados de manejo florestal para a produção de bioenergia (He *et al.*, 2016). Os preços da energia, políticas públicas e desenvolvimentos tecnológicos demandam melhores trabalhos (Ayoub *et al.*, 2019). A demanda crescente por combustíveis, como a gasolina, o diesel e óleos, impõe desafios significativos à capacidade e qualidade da indústria dos Estados Unidos, requerendo atenção especial para políticas relacionadas a gases do efeito estufa e combustíveis utilizados no transporte (Forman *et al.*, 2014).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constata-se uma abrangente aplicabilidade e impacto positivo da Programação Linear (PL) na otimização de processos industriais. Ao agrupar as diversas aplicações em seis categorias distintas, desde a minimização de desperdícios na indústria madeireira até a gestão eficiente de mão de obra na indústria automotiva, os estudos refletem a capacidade dessa abordagem matemática em melhorar significativamente a utilização das horas de trabalho, produtividade e lucratividade. A integração dessas técnicas em diferentes setores, como plásticos, serviços e mineração, ressalta a versatilidade da PL na resolução de desafios operacionais.

Considera-se que há desafios complexos enfrentados pela PL na indústria, especialmente na integração de práticas sustentáveis. Categorizados em três grupos, esses obstáculos transcendem as esferas tradicionais econômicas, abordando questões cruciais como a sustentabilidade na produção de alimentos e o equilíbrio entre políticas ambientais e agrícolas. A interconexão global dos recursos naturais, como água, terra e energia, destaca a necessidade de estratégias proativas. Na indústria de manufatura, a pressão por redução nas margens de lucro confronta-se com a responsabilidade socioambiental, exigindo decisões

equilibradas. Neste sentido, é importante observar que a busca por maior lucratividade pode gerar impactos negativos nos aspectos sociais e ambientais.

A abrangência e complexidade da relação entre a indústria e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), evidencia contribuições positivas em setores como energia renovável e erradicação da pobreza. Destacam-se conexões entre diferentes indústrias e ODS, revelando desafios, especialmente nas áreas de vida terrestre e consumo responsável. A integração de práticas sustentáveis nas indústrias emerge como uma oportunidade significativa para impulsionar avanços em direção aos ODS, delineando um futuro promissor para aplicações futuras da programação linear.

Ao explorar a interseção da programação linear com as perspectivas e oportunidades de aplicação, identificam-se áreas emergentes e cruciais para a sustentabilidade. Os temas abordados, como descarbonização, mudanças climáticas e eficiência energética, destacam a necessidade premente de estratégias inovadoras na indústria. A busca por sustentabilidade em recursos naturais limitados, como evidenciado nos estudos, reflete o compromisso crescente com a redução de emissões de carbono e políticas reformuladas. A compreensão dessas dinâmicas oferece *insights* valiosos para moldar práticas mais sustentáveis, sinalizando a importância contínua de investir em inovação e adaptação de políticas para enfrentar os desafios ambientais e industriais contemporâneos.

Como recomendação para trabalhos futuros, a realização de estudos sobre a aplicação da PL relacionada aos preços da energia, políticas públicas e desenvolvimento tecnológico. Essa abordagem promoverá uma compreensão mais aprofundada das interações complexas entre a Programação Linear e os elementos-chave que moldam o cenário energético e tecnológico, contribuindo para soluções mais abrangentes e eficazes no contexto da indústria moderna.

REFERÊNCIAS

ABENSUR, Eder Oliveira. A substituição de bens de capital: um modelo de otimização sob a óptica da Engenharia de Produção. **Gestao e Producao**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 525–538, 2015.

ALLISON, John *et al.* Optimal forage and supplement balance for organic dairy farms in the Southeastern United States. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 189, n. April 2020, p. 103048, 2021.

AYOUB, A. N. *et al.* The development of a carbon roadmap investment strategy for carbon intensive food retail industries. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 161, p. 333–342, 2019.

AZLAN, N. A. A. B. N. *et al.* Application of optimization technique in managing labour productivity for an automotive company. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 3474–3481, 2019.

BARBOSA, Luiz Carlos; GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro. Assessment of efficiency and sustainability in a chemical industry using goal programming and AHP. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 55, n. Itqm, p. 165–174, 2015.

CARO, F.; GALLIEN, J. Inventory management of a fast-fashion retail network. **Operations Research**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 257–273, 2010.

CHANG, Youngho; LI, Yanfei. Power generation and cross-border grid planning for the integrated ASEAN electricity market: A dynamic linear programming model. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 153–160, 2013.

CHOI, Donghyun; AHN, Young-Hwan; CHOI, Dong Gu. Multi-criteria decision analysis of electricity sector transition policy in Korea. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 29, p. 100485, 2020.

COBO, M. J. *et al.* An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 146–166, 2011.

COROMINAS, A.; LUSA, A.; PASTOR, R. Planning annualised hours with a finite set of weekly working hours and joint holidays. **Annals of Operations Research**, [s. l.], v. 128, n. 1–4, p. 217–233, 2004.

DALIN, C. *et al.* Balancing water resource conservation and food security in China. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 112, n. 15, p. 4588–4593, 2015.

DESCAMPS, E. *et al.* Coupling deterministic and random sequential approaches for structure and texture prediction of a dairy oil-in-water emulsion. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 25, n. C, p. 28–39, 2014.

DI, Tian. The Implementation of Supply-side Structural Reform: Next Chapter for High-Tech Development Zones. **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 235, p. 02036,

2021.

DIAZ-BALTEIRO, L. *et al.* Using quantitative techniques to evaluate and explain the sustainability of forest plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, [s. l.], v. 46, n. 9, p. 1157–1166, 2016.

FENDT, A. *et al.* A Formal Optimization Model for 5G Mobile Network Slice Resource Allocation. In: (Saha H. N. Chakrabarti S., Ed.)2018 IEEE 9TH ANNUAL INFORMATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MOBILE COMMUNICATION CONFERENCE, IEMCON 2018 2019, **Anais...** : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019.

FONT VIVANCO, David; WANG, Ranran; HERTWICH, Edgar. Nexus Strength: A Novel Metric for Assessing the Global Resource Nexus. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1473–1486, 2018.

FORMAN, Grant S. *et al.* U.S. Refinery efficiency: Impacts analysis and implications for fuel carbon policy implementation. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 48, n. 13, p. 7625–7633, 2014.

FOROOZANDEH, Z. *et al.* A mixed binary linear programming model for optimal energy management of smart buildings. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 7, 2020.

GAMRATH, Gerald *et al.* Tackling industrial-scale supply chain problems by mixed-integer programming. **Journal of Computational Mathematics**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 866–888, 2019.

GASSEN, Gustavo; GRACIOLLI, Odacir Deonísio; CHIWIACOWSKY, Leonardo Dagnino; MESQUITA, Alexandre. Proposta de um modelo de programação linear para otimização do planejamento agregado de produção de brocas para empresa multinacional. **Revista Produção Online**. Florianópolis, SC, v. 19, n. 1, p. 21-43, 2019.

GEBENNINI, Elisa *et al.* Minimizing operators' walking times into a linear system layout. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 49, n. 12, p. 1709–1714, 2016.

GLITHERO, N. J.; RAMSDEN, S. J.; WILSON, P. Farm systems assessment of bioenergy feedstock production: Integrating bio-economic models and life cycle analysis approaches. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 109, n. 2012, p. 53–64, 2012.

GONZÁLEZ-APARICIO, I. *et al.* Opportunities of Integrating CO₂ Utilization with RES-E: A Power-to-Methanol Business Model with Wind Power Generation. In: (Twinning S. Dixon T. Laloui L., Ed.)ENERGY PROCEDIA 2017, **Anais...** : Elsevier Ltd, 2017.

GOWREESUNKER, B. L.; TASSOU, S.; ATUONWU, J. Cost-energy optimum pathway for the UK food manufacturing industry to meet the UK national emission targets. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 10, 2018.

HAGSPIEL, S. *et al.* Cost-optimal power system extension under flow-based market coupling. **Energy**, [s. l.], v. 66, p. 654–666, 2014.

HE, L. *et al.* Regional woody biomass supply and economic impacts from harvesting in the southern U.S. **Energy Economics**, [s. l.], v. 60, p. 151–161, 2016.

HOOGEVEEN, Han; TOMCZYK, Jakub; VAN DER ZANDEN, Tom C. Flower power: Finding optimal plant cutting strategies through a combination of optimization and data mining. **Computers and Industrial Engineering**, [s. l.], v. 127, n. November 2017, p. 39–44, 2019.

HUKA, Maria Anna *et al.* Capacity planning of a mixed-model assembly line for prefabricated housebuilding elements. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 180, n. 2019, p. 706–713, 2021.

IANDA, T. F. *et al.* Optimizing the cooperated “multi-countries” biodiesel production and consumption in sub-saharan africa. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 18, 2020.

KAMAL, Ahmed E.; MEMBER, Senior; AL-KOFAHI, Osameh. Ef fi cient and Agile 1 + N Protection. [s. l.], v. 59, n. 1, p. 169–180, 2011.

KANTAS, Alperen Burak; COBULOGLU, Halil I.; BÜYÜKTAHTAKN, I. Esra. Multi-source capacitated lot-sizing for economically viable and clean biofuel production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 94, p. 116–129, 2015.

KO, Sangpil *et al.* Economic, social, and environmental cost optimization of biomass transportation: a regional model for transportation analysis in plant location process. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 582–598, 2019.

MATOUŠEK, Jiří; GÄRTNER, Bernd. **Understanding and using linear programming**. [s.l: s.n.]. v. 44

MCAULIFFE, G. A.; TAKAHASHI, T.; LEE, M. R. F. Applications of nutritional functional units in commodity-level life cycle assessment (LCA) of agri-food systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 208–221, 2020.

NAZARI, Mateus Torres; MAZUTTI, Janaína; BASSO, Luana Girardi; COLLA, Luciane Maria; BRANDLI, Luciana. Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], n. 0123456789, 2020.

NIDUMOLU, U. B. *et al.* Engaging farmers on climate risk through targeted integration of bio-economic modelling and seasonal climate forecasts. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 149, p. 175–184, 2016.

OGUNRANTI, Gbemileke A.; OLULEYE, Ayodeji E. Minimizing waste (off-cuts) using cutting stock model: The case of one dimensional cutting stock problem in wood working industry. **Journal of Industrial Engineering and Management**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 834–859, 2016.

RAUSCH, P.; STUMPF, M. Interactive fuzzy decision support to adjust human resource structures. In: (Camp O. Filipe J. Filipe J. Hammoudi S. Smialek M., Ed.) ICEIS 2018 - PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS 2018, **Anais...** : SciTePress, 2018.

REY, P. A.; MUÑOZ, J. A.; WEINTRAUB, A. A column generation model for truck routing in the chilean forest industry. **INFOR**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 215–221, 2009.

SANTOS, Ricardo França; SOUZA JUNIOR, Eugênio Correa de; BOUZADA, Marco Aurélio Carino. A aplicação da programação inteira na solução logística do transporte de carga: o solver e suas limitações na busca pela solução ótima. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.12, n. 1, p. 185-204, jan./mar. 2012.

SCHOEPF, Michael; WEIBELZAHN, Martin; NOWKA, Lisa. The Impact of Substituting Production Technologies on the Economic Demand Response Potential in Industrial Processes. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 2217, 2018.

SHI, L. *et al.* The mine locomotive wireless network strategy based on successive interference cancellation with dynamic power control. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [s. l.], v. 13, n. 5, 2017.

SILLEKENS, T.; KOBERSTEIN, A.; SUHL, L. Aggregate production planning in the automotive industry with special consideration of workforce flexibility. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 49, n. 17, p. 5055–5078, 2011.

SONG, J.; ZHANG, K.; CAO, Z. 3Es System Optimization under Uncertainty Using Hybrid Intelligent Algorithm: A Fuzzy Chance-Constrained Programming Model. **Scientific Programming**, [s. l.], v. 2016, 2016.

SPRONG, J. P. *et al.* Quality-aware control for optimizing meat supply chains. In: 2019 18TH EUROPEAN CONTROL CONFERENCE, ECC 2019 2019, **Anais...** : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019.

SUN, G. *et al.* A framework of resource provisioning and customized energy-efficiency optimization in virtualized small cell networks. **KSII Transactions on Internet and Information Systems**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 5701–5722, 2018.

VALLERIO, Mattia *et al.* An interactive decision-support system for multi-objective optimization of nonlinear dynamic processes with uncertainty. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 42, n. 21, p. 7710–7731, 2015.

VANDERBEI, Robert J. **Linear programming: Foundations and extensions**. [s.l.: s.n.]. v. 285, 2020.

VIJAY, A.; HAWKES, A. The techno-economics of small-scale residential heating in low carbon futures. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 11, 2017.

WAHL, A. *et al.* Serial ¹³C-based flux analysis of an L-phenylalanine-producing *E. coli* strain using the sensor reactor. **Biotechnology Progress**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 706–714, 2004.

WALDEMARSSON, M.; LIDESTAM, H.; KARLSSON, M. How energy price changes can affect production- and supply chain planning – A case study at a pulp company. **Applied Energy**, [s. l.], v. 203, p. 333–347, 2017.

WANG, C. N.; NHIEU, N. L.; TRAN, T. T. T. Stochastic chebyshev goal programming mixed integer linear model for sustainable global production planning. **Mathematics**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 1–23, 2021.

AUTORES

Anderson Hoose

Possui Graduação em Administração pela Universidade de Passo Fundo (2001), Especialização em Gestão Estratégica Empresarial pela UPF (2003). Graduação em Engenharia de Produção Mecânica pela UPF (2010), Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação pela UPF (2013), Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental pela UPF (2021). Tem experiência profissional na área de Estudo de Tempos e Métodos como Processista, e na Supervisão e Coordenação da Área de Planejamento e Controle de Produção. Atuou na Indústria de Implementos Agrícolas Jan S.A., de janeiro de 1997 até julho de 2015. Atua como Professor na Universidade de Passo Fundo - UPF, no Instituto de Tecnologia? ITec, desde abril de 2012 até hoje. Atua como Professor no Instituto Estadual de Educação São Francisco Solano, no Curso Profissionalizante de Mecânica, desde agosto de 2022 até hoje. Atuou na Coordenação do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da UPF nos períodos 2015/01, e 2018/02 até 2022/02. Atua como Coordenador do Curso de Engenharia de Produção da UPF nos períodos de 2017/02, 2021/02 até 2022/01, e 2022/02 até hoje.

Moacir Kripka

Possui graduação em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS (1986), especialização em estruturas também pela

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1987), mestrado em Engenharia Civil pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ (1990), doutorado em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC/USP (1998) e Pós-doutorado (Professor Visitante) no Instituto de Ciência e Tecnologia do Concreto da Universidade Politécnica de Valência, Espanha - ICITECH/UPV, em 2018. Professor Titular da Universidade de Passo Fundo, foi Coordenador do Curso de Engenharia Civil (de 1991 a 1994 e de 1998 a 2000) e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (de 2009 a 2011 e de 2011 a 2013). Coeditor da Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas - CIATEC/UPF e da Revista Sulamericana de Engenharia Estrutural. Editor Acadêmico do Journal of Advances in Civil Engineering. Membro do Conselho Editorial do Journal of Advances in Computational Design, do International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research, do Journal of Advances in Concrete Construction e da Standards. Avaliador de Cursos de Graduação Basis/INEP/MEC desde 2007. Presidente do Conselho Administrativo da Associação de Engenheiros e Arquitetos de Passo Fundo de 2015 a 2022. Membro titular do Comitê de Assessoramento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - Fapergs na área das Engenharias. Professor colaborador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco desde 2023. Professor Permanente do Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da UPF (mestrado profissional) desde 2023. Atua na área de Engenharia Civil, com ênfase nos temas de otimização e análise estrutural.



Artigo recebido em: 14/09/2023 e aceito para publicação em: 15/11/2023
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5004>