

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

SELEÇÃO DO MIX DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIA DE
IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS COM FOCO NA
SUSTENTABILIDADE

Anderson Hoose

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

H789s Hoose, Anderson

Seleção do mix de produção em indústria de implementos agrícolas com foco na sustentabilidade / Anderson Hoose. – 2021.

154 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Kripka.

Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Impacto ambiental. 2. Sustentabilidade. 3. Implementos agrícolas. 4. Ciclo de vida do produto. 5. Processos de fabricação. I. Kripka, Moacir, orientador. II. Título.

CDU: 631.3

Catálogo: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Anderson Hoose

SELEÇÃO DO MIX DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIA DE
IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS COM FOCO NA
SUSTENTABILIDADE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Data da defesa: 15/12/2021

Membros componentes da Banca examinadora

Professor Doutor Moacir Kripka
Orientador
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Fábio Antonio Sartori Piran
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos / RS

Professor Doutor Orlando Mauricio Durán Acevedo
Pontificia Universidade Católica de Valparaíso – PUCV, Chile

Professor Doutor Wu Xiao Bing
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Zacarias Martin Chamberlain Pravia
Universidade de Passo Fundo - PPGEng/UPF

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por todas as oportunidades que Ele colocou no meu caminho.

Agradeço a minha esposa, Juliani, pelo incentivo e apoio em todos os momentos. O seu amor e companheirismo foram fundamentais para conseguir seguir em frente.

Aos meus pais, Ivo e Liane, que me ensinaram a ter fé, persistência e acreditar nos meus objetivos.

Agradeço ao professor, Dr. Moacir Kripka, que me orientou desde a primeira aula no curso até a finalização deste trabalho. Ao compartilhar o seu conhecimento e experiência, que foram fundamentais para o alcance dos objetivos.

Agradeço aos professores membros da banca examinadora, Dr. Fábio Antonio Sartori Piran, Dr. Orlando Mauricio Durán Acevedo, Dr. Wu Xiao Bing e Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia, que contribuíram de forma significativa para o aperfeiçoamento do trabalho e um olhar sobre novas oportunidades na abordagem do estudo da tese. Agradeço também ao Dr. Victor Yepes.

Agradeço à Universidade de Passo Fundo, pela oportunidade e pelo auxílio com a bolsa parcial de estudos. Também agradeço à Coordenação e Professores do programa de doutorado, que contribuíram para a construção do conhecimento e ensinamentos obtidos ao longo do curso.

Agradeço à Indústria de Implementos Agrícolas, aos Profissionais e Colegas da indústria pelas informações, abertura de espaço, visitação à empresa, para que os objetivos da tese pudessem ser estruturados.

Quero agradecer aos colegas de doutorado e colegas do grupo de orientação, pelo companheirismo, troca de informações e conhecimento. Tais fatores foram importantes para visualizar novas oportunidades e caminhos na estruturação do trabalho.

Por fim, agradeço à todas as pessoas com as quais contatei no desenvolvimento desta tese e que de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta importante etapa.

RESUMO

HOOSE, A. **Seleção do mix de produção em indústria de implementos agrícolas com foco na sustentabilidade.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul).

O desenvolvimento das tecnologias de fabricação vem revolucionando as mais diversas áreas da sociedade moderna e do desenvolvimento sustentável, associado a uma oferta cada vez mais diversificada de produtos. Neste contexto, o objetivo do trabalho é selecionar o melhor mix de produção na linha de produção de carretas graneleiras, em uma indústria de implementos agrícolas, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão. O estudo foi realizado em uma indústria de implementos agrícolas, analisando a produção de 5 modelos de carretas graneleiras, com capacidade de transporte de 10.500 até 15.000 litros. Fez-se a análise do inventário do berço-a-portão, dos materiais: aço carbono, aço inox, PVC e a tinta líquida. Também foram avaliados os processos de fabricação: corte laser, solda MIG, solda MIG inox, pintura a pó e a zincagem de peças. Em seguida, fez-se um estudo por mix de produção, totalizando 7 configurações distintas no mix de produtos, totalizando 3 implementos por dia. Os materiais e processos foram analisados considerando o impacto ambiental com o uso da base de dados do software SimaPro® versão 9.0.0.49, na metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H. Avaliaram-se as 22 categorias de impacto *midpoint* e as 3 categorias de impacto *endpoint*: saúde humana, ecossistemas e escassez de recursos. Foi aplicado o método da programação linear inteira para avaliar os critérios econômicos e de minimizar o impacto ambiental. O método foi validado com o uso da simulação computacional, software *Tecnomatix Plant Simulation* versão 15. Após validação, os critérios econômicos e ambientais foram colocados em uma matriz de decisão, aplicando-se as técnicas AHP e DEA, considerando as alternativas do mix de produção e da programação linear inteira. Na técnica AHP foram consideradas também as opiniões de profissionais da indústria para a ponderação dos critérios. Dentre os resultados observou-se uma correlação forte entre o uso dos materiais de aço carbono, aço inox, o processo de corte laser e o impacto ambiental. O aço inox e o corte laser promovem os maiores impactos ambientais, principalmente na saúde humana. Nas técnicas AHP e DEA as alternativas 1 e 11, de fabricar 3 produtos por dia foi selecionada como a melhor, considerando os critérios de sustentabilidade, atendendo o plano de produção da indústria.

Palavras-chaves: Impacto Ambiental. Avaliação do Ciclo de Vida. Otimização. Tomada de Decisão. Implementos Agrícolas.

ABSTRACT

HOOSE, A. **Selection of production mix in the agricultural implement industry with a focus on sustainability.** Thesis (PhD in Engineering - Civil and Environmental Engineering Graduate Program, University of Passo Fundo, Rio Grande do Sul).

The development of manufacturing technologies has revolutionized the most diverse areas of modern society and sustainable development, associated with an increasingly diversified offer of products. In this context, the objective of this work is to select the best product mix in the production line of grain trailers, in an agricultural implements industry, considering sustainability in the application of optimization and decision-making techniques. The study was carried out in an agricultural implements industry, analyzing the production of 5 models of grain trailers, with transport capacity from 10,500 to 15,000 liters. An analysis was made of the cradle-to-gate inventory, materials: carbon steel, stainless steel, PVC, and liquid paint. The manufacturing processes were also evaluated: laser cutting, MIG welding, stainless steel MIG welding, powder painting, and zinc plating of parts. Then, a study was carried out by production mix, totaling 7 different configurations in the product mix, totaling 3 implements per day. The materials and processes were analyzed considering the environmental impact using the SimaPro® software database version 9.0.0.49, in the ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H methodology. The 22 midpoint impact categories and the 3 endpoint impact categories were evaluated: human health, ecosystems, and resource scarcity. The integer linear programming method was applied to evaluate the economic criteria and to minimize the environmental impact. The method was validated using computer simulation, software Tecnomatix Plant Simulation version 15. After validation, the economic and environmental criteria were placed in a decision matrix, applying the AHP and DEA techniques, considering the alternatives of the production mix and integer linear programming. In the AHP technique, the opinions of industry professionals were also considered for the weighting of the criteria. Among the results, a strong correlation was observed between the use of carbon steel materials, stainless steel, the laser cutting process, and the environmental impact. Stainless steel and laser cutting have the greatest environmental impacts, especially on human health. In the AHP and DEA techniques, alternatives 1 and 11, to manufacture 3 products per day, were selected as the best, considering the sustainability criteria, meeting the industry's production plan.

Keywords: Environmental impact. Life Cycle Assessment. Optimization. Decision Making. Agricultural implements.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Algoritmo de Colônia de Abelhas Artificiais
ACO	Algoritmo de Colônia de Formigas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASA	<i>Adaptive Simulated Annealing</i>
BA	Algoritmo de Morcegos
BSA	Algoritmo <i>Backtracking Search</i>
CEO	<i>Chief Executive Officer</i>
CI	Índice de consistência
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRS	<i>Constant Returns to Scale</i>
CSO	Algoritmo de Bando de Aves
DBN	Algoritmo Híbrido de <i>Deep Belief Networks</i>
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DEM	Simulação de Elementos Discretos
DMU	Unidade de Marcação de Decisão
ELMPSO	<i>Extreme Learning Machine</i> com o Algoritmo de Enxame de Partículas
ERASM	<i>Environment and Health - Risk Assessment & Management</i>
FA	Algoritmo de Colônia de Vaga-lumes
FE	Elementos Finitos
GA	Algoritmo Genético
GA-RSM	Algoritmo Genético e a Metodologia de Superfície de Resposta
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLO	Global
h	hora
HFLTS	<i>Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets</i>
IA	Inteligência Artificial
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIT	<i>Just In Time</i>
KPI	Indicador de Desempenho dos Processos
KRG	krigagem
laser	<i>light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LCSA	<i>Life Cycle Sustainability Assessment</i>
m	metro
m ²	metro quadrado
MCMC-MH	Algoritmo <i>MetropolisHastings</i> da Cadeia de Markov em Monte Carlo
MHS	Algoritmo de Busca de Harmonia Modificada
MIG	<i>Metal Inert Gás</i>
MILP	Programação Linear Inteira Mista
MOPSO	Algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas Multiobjetivo
mPt	mili-ponto, valor padrão de indicador ecológico
NSGA	Algoritmo Genético de Classificação Não Dominado

ODS	Objetivo do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	<i>Part consolidation</i>
PCBs	Placas de Circuito Impresso
PCP	Planejamento e Controle de Produção
PEAD-V	Polietileno de Alta Densidade Virgem
PEAD-Ve	Polietileno de Alta Densidade Verde
PEAD-R	Polietileno de Alta Densidade Reciclado
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PS	Algoritmo de Busca de Padrões
PSO	Algoritmo de enxame de partículas
Pt	Ponto, valor padrão de indicador ecológico
PVC	Policloreto de vinila
QRSM	Modelo de Superfície de Resposta Quadrática
r	Coefficiente de correlação linear
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RC	Razão de Coerência
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i>
RMSs	Sistemas de Manufatura Robótica
RoW	<i>Rest-of-World</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SFL	<i>Shuffled Frog-leaping</i>
SIMP	Método de Interpolação de Densidade
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
SVR	Regressão por Vetores-suporte
TLBO	<i>Teaching Learning Based Optimization</i>
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TSP	Problema do Caixeiro Viajante
USLCI	Inventário do Ciclo de Vida dos Estados Unidos
VRPs	Problemas de Roteamento de Veículos
VRS	<i>Variable Returns to Scale</i>
WIP	Material em Processamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de uma ACV	24
Figura 2 – Representação do processo econômico definido em função da dimensão econômica e ambiental	25
Figura 3 – Objetivos do desenvolvimento sustentável	29
Figura 4 - Mapeamento do processo de seleção do portfólio da literatura científica	33
Figura 5 - Representatividade na utilização dos métodos e modelos	36
Figura 6 - Fluxograma da metodologia de pesquisa sobre PL	39
Figura 7 - Aplicação da PL na indústria	40
Figura 8 - Desafios no uso da PL	43
Figura 9 - Relação da indústria com os ODS e uso da PL	45
Figura 10 - Densidade e centralidade dos principais temas da PL	49
Figura 11 - A “escala de importância fundamental”, proposta por Saaty	54
Figura 12 - Fluxograma da metodologia de pesquisa sobre o AHP	55
Figura 13 - Aplicações da AHP na indústria	56
Figura 14 - Desafios na aplicação da AHP	57
Figura 15 - Tomada de decisão na indústria e a relação com o desenvolvimento sustentável	59
Figura 16 - Fluxograma da Metodologia de pesquisa sobre DEA	65
Figura 17 - Aplicação da DEA na indústria	65
Figura 18 - Dois modelos de carretas graneleiras.....	72
Figura 19 – Configurações do produto em estudo.....	72
Figura 20 - Visualização total do sistema da indústria de implementos agrícolas	73
Figura 21 - Visualização total da área de manufatura da indústria de implementos agrícolas	73
Figura 22 - Fluxo principal de peças Unidade fabril III	74
Figura 23 – Mapa mental das etapas para o desenvolvimento do trabalho	76
Figura 24 - Representação dos materiais e processos aplicados no estudo	78
Figura 25 - Estrutura do Projeto no SimaPro®	85
Figura 26 - Fluxo e tempos em horas de produção para 1m ² dos produtos.....	87
Figura 27 - Impactos ambientais dos materiais por pontuação única gerados por m ² de produto.....	97
Figura 28 – Impacto na Saúde humana (materiais por m ² de produto)	97
Figura 29 – Impacto nos Ecossistemas (materiais por m ² de produto)	98
Figura 30 – Impacto na Escassez de Recursos (materiais por m ² de produto).....	100
Figura 31 - Impactos ambientais dos processos de fabricação por pontuação única gerados por m ² de produto	101
Figura 32 - Impacto na Saúde humana (processos de fabricação por m ² de produto).....	101
Figura 33 - Impacto nos Ecossistemas (processos de fabricação por m ² de produto).....	102
Figura 34 - Impacto na Escassez de Recursos para o total de processos.....	103
Figura 35 - Impactos ambientais gerados por m ² de produto considerando os materiais..	104
Figura 36 - Impactos ambientais gerados por m ² de produto considerando os processos	104
Figura 37 - Impactos ambientais gerados por m ² de produto (materiais + processos).....	105
Figura 38 - Impactos ambientais gerados pelo mix de produtos considerando materiais e processos.....	105
Figura 39 - Coeficiente de correlação linear de Pearson (r): a) correlação linear entre aço inox e aço carbono, b) correlação linear entre aço carbono e impacto ambiental, c)	

correlação linear entre aço inox e impacto ambiental, d) correlação linear entre horas de corte em máquina a laser e aço inox.....	108
Figura 40 - Relação entre impacto ambiental x material x processo.....	109
Figura 41 - Impacto ambiental da PLI.....	111
Figura 42 – Comparação das alternativas do mix de produção com valores normalizados	114
Figura 43 - Cenário elaborado no software <i>Plant Simulation</i>	115
Figura 44 - Comparação dos percentuais do tempo de trabalho entre a PLI e a simulação computacional (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec).....	116
Figura 45 - Análise de sensibilidade das 7 alternativas no critério lucratividade	119
Figura 46 - Análise de sensibilidade das 9 alternativas no critério lucratividade	121
Figura 47 - Análise de sensibilidade da lucratividade.....	123
Figura 48 - Impacto ambiental de 1kg de alumínio comparado aos demais materiais.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese de estudos sobre sustentabilidade	27
Tabela 2 – Síntese dos métodos de otimização e modelos computacionais e aplicados na indústria	34
Tabela 3 – Métodos de otimização e tipos de indústria onde foram aplicados os estudos..	36
Tabela 4 - Síntese das aplicações dos métodos de otimização da programação linear	41
Tabela 5 - Relação dos ODS com a indústria	47
Tabela 6 - Modelo genérico exibindo critérios, pesos e alternativas.....	53
Tabela 7 - Síntese do foco dos estudos nos ODS	61
Tabela 8 - Demanda de produtos, lucratividade e ritmo de produção	75
Tabela 9 - Materiais utilizados por m ² de produto.....	77
Tabela 10 - Processos de fabricação utilizados por m ² de produto	78
Tabela 11 - Categorias de impactos e danos de acordo com a metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H	79
Tabela 12 - Composição % das matérias-primas nos produtos	80
Tabela 13 - Composição % dos processos de preparação de superfície e pintura.....	82
Tabela 14 - Composição % dos processos de fabricação na etapa inicial de corte	83
Tabela 15 - Composição % dos processos de preparação para solda e soldagem.....	83
Tabela 16 - Alternativas analisadas com base na demanda do mix de produtos.....	84
Tabela 17 - Matriz de comparação na técnica AHP	93
Tabela 18 - Valores recalculados de RI, segunda versão proposta por Saaty	93
Tabela 19 - Dados de <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	95
Tabela 20 - Visão dos maiores impactos dos materiais e processos de fabricação	106
Tabela 21 - Cenários da PLI (Funções objetivo 1, 2, 3 e 4)	110
Tabela 22 - Comparativo de resultados para os produtos 15.0DcTmec e 10.5DcTmul....	111
Tabela 23 - Comparativo de resultados PCP alternativa 1 e PLI	112
Tabela 24 - Comparativo de resultados PCP alternativa 6 e PLI	113
Tabela 25 - Valores de impacto ambiental e econômico referente as 11 alternativas do mix de produção.....	113
Tabela 26 - Matriz com 6 critérios e 7 alternativas	117
Tabela 27 - Comparação dos critérios	117
Tabela 28 - Matriz do resultado final das 7 alternativas.....	118
Tabela 29 - Matriz com 6 critérios e 9 alternativas	120
Tabela 30 - Matriz do resultado final de todas as alternativas	120
Tabela 31 - Comparação dos critérios por 3 profissionais	122
Tabela 32 - Resultado final avaliação dos profissionais.....	122
Tabela 33 - Dados de inputs e outputs das 7 alternativas do mix de produção	125
Tabela 34 - Técnica DEA com orientação de <i>Input</i> – Tipo: CRS	126
Tabela 35 - Técnica DEA com orientação de <i>Input</i> – Tipo: CRS (11 alternativas).....	126
Tabela 36 - <i>Ranking</i> das 11 alternativas	127

Sumário

RESUMO	5
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	155
1.1 Problema de pesquisa	16
1.2 Justificativa do trabalho.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura da Tese	20
2. REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 Sustentabilidade.....	22
2.2 Avaliação do ciclo de vida.....	23
2.3 Avaliação da sustentabilidade no ciclo de vida	26
2.3.1 Objetivos do desenvolvimento sustentável	28
2.3.1.1 ODS9 – Indústria, inovação e tecnologia	30
2.4 Otimização.....	32
2.4.1 Aplicação dos estudos de otimização	32
2.4.2 Aplicação da otimização e tipo de indústria.....	36
2.5 Programação Linear.....	37
2.5.1 Metodologia revisão bibliométrica e sistemática sobre programação linear.....	38
2.5.2 Aplicações da programação linear na indústria.....	40
2.5.3 Desafios na aplicação da programação linear.....	43
2.5.4 A indústria e a relação com os ODS.....	44
2.5.5 Perspectivas e oportunidades na aplicação da programação linear	48
2.6 Técnicas para a tomada de decisão.....	51
2.6.1 A técnica AHP	53
2.6.1.1 Metodologia de revisão bibliométrica e sistemática sobre a técnica AHP.....	54
2.6.1.2 Aplicações da técnica AHP na indústria.....	55
2.6.1.3 Desafios na aplicação da AHP	57

2.6.1.4 A indústria e a relação com os ODS no uso da AHP	59
2.6.1.5 Perspectivas e oportunidades com o uso da AHP	62
2.6.2 A técnica DEA.....	63
2.6.2.1 Metodologia revisão bibliométrica e sistemática sobre o método DEA	64
2.6.2.2 Aplicações da técnica DEA na indústria	65
2.6.2.3 Desafios na aplicação do método DEA	67
2.6.2.4 A indústria e a relação com os ODS no uso do DEA	68
2.6.2.5 Perspectivas e oportunidades com o uso da DEA	69
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	71
3.1 Identificação do problema	71
3.2 Delimitação do estudo	71
3.2.1 O setor e o fluxo de produção.....	73
3.3 A metodologia para o desenvolvimento do trabalho	75
3.3.1 Análise de Inventário.....	76
3.3.2 Análise de cenários e avaliação do impacto ambiental por matéria-prima	79
3.3.2.1 Análise de cenários por matéria-prima.....	80
3.3.2.2 Análise de cenário por processos de fabricação	82
3.3.2.3 Análise de cenários por mix de produtos.....	84
3.3.2.4 Montagem dos cenários no software SimaPro®	84
3.3.3 Formular o modelo da programação linear inteira	85
3.3.3.1 Validação com o uso da simulação computacional	92
3.3.4 Análise com uso da técnica AHP	92
3.3.4.1 Análise de sensibilidade	94
3.3.5 Análise com uso da técnica DEA	94
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	96
4.1 Avaliação do impacto ambiental por matéria-prima	96
4.2 Avaliação do impacto ambiental por processo	100
4.3 Avaliação do impacto ambiental por produto	103
4.4 Avaliação do impacto ambiental por mix de produtos	105
4.4 Os cenários com o uso da programação linear inteira	110
4.4.1 Validação do modelo da programação linear inteira	115
4.5 Avaliação com uso da técnica AHP	117

4.5.1 Técnica AHP com as 7 alternativas do mix de produtos.....	117
4.5.2 Técnica AHP com as 7 alternativas do mix de produtos e a PLI	119
4.5.3 Técnica AHP considerando profissionais da indústria.....	121
4.6 Análise envoltória de dados (DEA).....	125
4.7 Comparativo entre as técnicas AHP e a DEA	127
4.8 Proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação	130
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5.1 Limitações do escopo do estudo e das considerações finais	135
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	135
REFERÊNCIAS	136
Anexo 1 - Produção científica relacionada com a tese	154

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das tecnologias de fabricação proporcionou uma revolução nas mais diversas áreas da sociedade moderna e do desenvolvimento sustentável, onde tem-se a manufatura, a infraestrutura e os avanços tecnológicos (AKINAGA, 2019; FILHO *et al.*, 2019). Do ponto de vista da manufatura, as indústrias trabalham atualmente com um grande volume de dados que podem contribuir para a tomada de decisão. A concorrência é crescente e existe a busca constante por melhorar a eficiência e manter a produção de produtos com alto nível de qualidade (FATRIAS *et al.*, 2018).

A indústria de implementos agrícolas também está inserida neste contexto. Produz implementos e máquinas de qualidade e oferece um variado mix de produtos, para atender as diversas necessidades do produtor rural. A concorrência nesse setor aumentou a partir do período de 1980 e está presente até hoje, quando o governo a partir de 1990 diminuiu os subsídios, as barreiras tarifárias e extinguiu a proteção cambial (JOSÉ; BACHA, 2013).

Outro aspecto que abrange o uso das tecnologias de fabricação, voltam-se para o desenvolvimento sustentável, onde no ODS9 (Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 9) busca-se aumentar significativamente a participação da indústria no emprego e no produto interno bruto, atualizar e modernizar a indústria (UNITED NATIONS, 2015). Entretanto, percebe-se que a indústria busca uma maior eficiência nos processos de produção, onde o aumento de produtividade e lucratividade são considerados os principais critérios para a tomada de decisão, justificando as melhorias a serem implementadas.

Na indústria de implementos agrícolas também há outras preocupações, no sentido de manter a atividade nos postos de trabalho, decorrente dos períodos de sazonalidade, com baixa demanda de produtos (SAURIN; FERREIRA, 2008). Para evitar esse impacto nas vendas, ocorre a fabricação de vários modelos de produtos, visando flexibilizar a produção na linha de montagem (REGINATO *et al.*, 2015). Com um mercado em expansão e uma variedade maior de produtos, cada vez mais é necessário saber qual o impacto que o uso da tecnologia de fabricação tem causado no meio ambiente.

Conforme números divulgados pela Anfavea (Associação dos Fabricantes de Veículos Automotores) em outubro de 2020, as vendas de máquinas agrícolas e rodoviárias deveriam crescer 5% no mercado interno, já para as exportações estimava-se uma queda de 31% em relação ao ano de 2019 (BRASIL, 2020). Outro dado que reforça a importância do setor de máquinas agrícolas é de que a Abimaq (Associação Brasileira da Indústria de

Máquinas e Equipamentos), prevê que o setor consiga se destacar no panorama da indústria nacional, diante da pandemia, onde as vendas no primeiro semestre de 2021 apresentam crescimento de 62% em comparação ao primeiro semestre de 2020 (ABIMAQ, 2021).

Demonstrada a importância da indústria de máquinas e implementos agrícolas no Brasil, a mesma passa a ser o assunto desta pesquisa, com a identificação dos principais materiais e processos de fabricação concernentes à avaliação dos impactos ambientais de berço-a-portão, que buscam trabalhar os parâmetros econômicos e ambientais para definição do melhor mix de produção, na linha de carretas graneleiras, utilizando uma indústria como objeto de estudo.

1.1 Problema de pesquisa

Na indústria de implementos agrícolas há poucos estudos que contemplam a relação que existe entre o mix de produção, a tecnologia de fabricação e o seu impacto ambiental, abrangendo os aspectos da sustentabilidade.

O problema pode estar relacionado ao modo como a indústria trabalha no ambiente do chão de fábrica, ou ainda, o problema da programação diária de pedidos para o chão de fábrica (HSU; YANG, 2017). O setor de Planejamento e Controle de Produção (PCP), geralmente se preocupa com dois critérios: 1) o sequenciamento da linha de produção; e 2) o balanceamento da linha de produção. Esses dois critérios buscam aproveitar melhor a capacidade produtiva nas linhas de produção, mas não analisam o impacto ambiental da tecnologia de fabricação. Assim, os impactos gerados no meio ambiente são os mesmos, em maior ou menor intensidade, dependendo do volume de produção.

Para grandes indústrias, a administração da produção tende a exigir um maior esforço. Em sistemas de produção com vários estágios, existem abordagens especiais de PCP para nivelar e coordenar a produção ao longo de toda a cadeia de processo. Uma boa sincronização da produção é necessária para configurar a linha de acordo com os produtos. Além disso, o controle de capacidade busca alocar a quantidade adequada de recursos humanos e materiais ao processo e evitar atrasos (GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017).

Por outro lado, o setor de Engenharia de Manufatura é o responsável pela definição da tecnologia de fabricação a ser utilizada para produzir os produtos, promovendo as

melhorias que podem ser empregadas nos processos. Esta alteração na tecnologia de fabricação vai alterar o impacto gerado no meio ambiente.

O setor de PCP juntamente com a Engenharia de Manufatura atuam na otimização e gerenciamento da produção. O tempo para a fabricação dos produtos é um parâmetro importante utilizado pelo PCP, resultante dos sistemas de manufatura e suas aplicações de fabricação (GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017).

Há vários sistemas disponíveis atualmente para coletar informações que podem ser utilizadas posteriormente em aplicativos de planejamento e controle (GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017). Diante da quantidade de informações que estão disponíveis, considera-se que é possível projetar ferramentas de suporte à decisão que forneçam uma solução diferente para o tomador de decisão (BORREGUERO-SANCHIDRIÁN *et al.*, 2018).

Diante disso, segue a questão principal da pesquisa: **é possível avaliar qual o impacto ambiental gerado pelo mix de produção da indústria de implementos agrícolas?**

1.2 Justificativa do trabalho

Os sistemas produtivos, em especial na indústria de implementos agrícolas, têm sido influenciados pela competição à nível global, com incrementos de tecnologia embarcada nas máquinas e implementos, produtos com maior complexidade, tanto em variabilidade de modelos como em precisão nas funções executadas pelos equipamentos. Esses aspectos afetam o custo de produção, a confiabilidade dos produtos, a estrutura das linhas de produção, a capacidade de atendimento das empresas, entre outros aspectos considerados estratégicos para o negócio. Considera-se que o Brasil é um país voltado para a manufatura, possui diversas montadoras de variados setores instalados, porém carece de pesquisa e desenvolvimento no assunto que abrange as linhas de montagem (SILVA; TUBINO; SEIBEL, 2014).

Assim, a adequada utilização dos recursos produtivos em ambientes de chão de fábrica é resultado de estudos que visam contribuir na minimização de perdas. Como exemplo: o uso da modelagem e simulação, que podem contribuir na visualização de um sistema completo, permitindo uma melhor percepção em uma situação real, para os

operadores e gestores, facilitando a aprovação de modificações propostas, auxiliando na tomada de decisão (SILVA *et al.*, 2017).

A melhoria também pode ser alcançada com o uso de modelos matemáticos bem como heurísticos, que possibilitam o trabalho de um variado mix de produtos, com base em uma demanda, proporcionando reduções nas restrições de capacidade produtiva das estações de trabalho (REGINATO *et al.*, 2015). Os modelos matemáticos e heurísticos geralmente vêm aliados à realização de experimentos computacionais, onde há o objetivo de testar a eficácia dos mesmos (SILVA; TUBINO; SEIBEL, 2014). A importância em melhorar os sistemas produtivos, deve-se ao fato da indústria de máquinas agrícolas também ser afetada pela sazonalidade nos períodos de baixa demanda (SAURIN; FERREIRA, 2008).

Entretanto, em paralelo com os avanços tecnológicos, aumento de produtividade e competitividade, estão as questões ambientais. Pode-se afirmar que nas universidades houve um aumento significativo no ensino e na pesquisa no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável, mas há poucos estudos que tenham apurado a relação entre inovação e sustentabilidade, mesmo que há evidências de convergência entre esses dois processos os benefícios são obtido a longo prazo (ÁVILA *et al.*, 2017).

As empresas da mesma forma são consideradas uma importante força transformadora, possuem o poder de inovação. Essa importância também é considerada pelos ODS (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável), mas sabe-se que a competição atual e o foco dos ODS faz com que seja desafiador utilizá-los para medir o progresso de uma nação (MUFF; KAPALKA; DYLLICK, 2017). O ODS9, visa promover a industrialização inclusiva e sustentável, com foco em tecnologia, inovação e infraestrutura sustentável. Considera-se que a infraestrutura vai influenciar diretamente na criação de emprego e ajudar a promover o desenvolvimento econômico em diferentes contextos, além de melhorar a qualidade de vida. Isso será possível com a cooperação internacional em pesquisa científica e desenvolvimento de tecnologia que vai contribuir na transferência de conhecimento entre as nações (FILHO *et al.*, 2019).

As melhorias na indústria geralmente se concentram na redução de desperdícios e utilização de novos processos, enquanto os mercados exigem maior flexibilidade e baixos custos de produtos (PÉREZ-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2019). Do ponto de vista mais estratégico, estão as questões que envolvem a sobrevivência da empresa (FIKSEL, 2006). É muitas vezes um desafio avaliar o verdadeiro efeito no desempenho corporativo, o que

pode ser melhor trabalhado se for tratado como um problema de vários critérios, principalmente se há objetivos conflitantes e um grau elevado de incertezas.

Outro aspecto, é de que geralmente as decisões são tomadas com base na experiência do decisor, ou ainda é possível observar divergências entre as análises dos tomadores de decisão podendo haver opiniões tendenciosas que influenciam de forma negativa o resultado (CALACHE *et al.*, 2019). Assim o uso de técnicas para melhorar o processo da tomada de decisão pode trazer importantes contribuições, pois a maior parte das melhorias na programação do mix de produção e nos processos de fabricação buscam por aspectos econômicos do negócio sendo imprescindível considerar o impacto desses avanços para o meio ambiente.

Neste sentido, a originalidade e a contribuição teórica desta tese está em selecionar o melhor mix de produção e apresentar o que isto pode trazer de contribuições com a sustentabilidade, sob o ponto de vista do impacto ambiental para a indústria de implementos agrícolas, utilizando técnicas de otimização e tomada de decisão para este fim.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Selecionar o melhor mix de produção na linha de produção de carretas graneleiras, em uma indústria de implementos agrícolas, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Efetuar amplo levantamento na literatura técnica acerca das potenciais aplicações das técnicas de otimização, com foco na programação linear e nas técnicas para tomada de decisão, com ênfase na indústria;
- b) Formular problemas de otimização dos processos de fabricação considerando como objetivos maximizar a lucratividade, maximizar o volume de produção, maximizar o tempo de trabalho e minimizar os impactos ambientais, de forma isolada ou simultaneamente;

- c) Efetuar a aplicação das formulações e das técnicas de tomada de decisão na indústria de implementos agrícolas;
- d) Com base nos resultados obtidos, buscar a proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação.

1.3 Estrutura da Tese

Esta tese é composta de cinco capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a introdução, o problema, a justificativa, o objetivo geral e os específicos. No segundo capítulo expõe-se uma revisão bibliográfica com base nos autores encontrados em cada assunto, que aborda em especial sobre a sustentabilidade, a análise do ciclo de vida, os objetivos do desenvolvimento sustentável, a otimização e suas aplicações, a programação linear e a tomada de decisão.

O segundo capítulo do trabalho está relacionado ao objetivo geral da tese, pois busca apresentar uma conceituação ampla sobre a sustentabilidade. Também são apresentados os conceitos de análise do ciclo de vida (ACV), os ODS, com ênfase no ODS9. Descreve-se sobre os métodos de otimização mais utilizados e em quais tipos de indústrias que ocorrem as aplicações. Buscou-se trabalhar a programação linear inteira aplicada à indústria de implementos agrícolas, relacionando os critérios econômicos e de impacto ambiental, a aplicação e conceituação das técnicas de tomada de decisão, considerando a técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e a técnica DEA (*Data Envelopment Analysis*).

No terceiro capítulo relatam-se os procedimentos metodológicos e cada uma das etapas que foram realizadas, onde demonstram-se as etapas que foram seguidas na elaboração do trabalho, vinculadas ao objetivo geral do trabalho. Foi definido o problema da pesquisa, realizado o inventário do ciclo de vida do berço-a-portão, avaliados os impactos ambientais e realizada a modelagem matemática para o cálculo da otimização. Percebe-se o atendimento ao segundo objetivo específico que é a formulação do problema de otimização. Na etapa final, para ambos os critérios: ambientais e econômicos, demonstra-se a composição das matrizes de comparação dos critérios para a tomada de decisão.

No quarto capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho. Como o objetivo do trabalho consistiu em aplicar técnicas de

otimização e tomada de decisão para a seleção do melhor mix de produção, considerando a sustentabilidade como um dos critérios decisórios, foram colocados e analisados os resultados dos impactos ambientais e da modelagem com o uso da programação linear inteira e após realizadas as análises com utilização das matrizes de decisão.

Os resultados dos objetivos específicos também são demonstrados no quarto capítulo, onde tem-se a aplicação das formulações da programação linear inteira na indústria de implementos agrícolas. Foram constatados pontos importantes referentes aos materiais e à tecnologia de fabricação e sua relação com os impactos ambientais. Todos os resultados das alternativas foram colocados na matriz de decisão e avaliados sob os critérios ambientais e econômicos. Também, com base nos resultados obtidos, atende-se ao quarto objetivo específico que é buscar a proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação.

No quinto capítulo encontram-se as considerações finais referentes ao trabalho. Este capítulo termina com as limitações do escopo do estudo e das considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros relacionados ao mesmo tema.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordados os conceitos provenientes de vários autores pesquisados na literatura pertinente ao assunto do trabalho, iniciando pelo conceito de sustentabilidade, a avaliação do ciclo de vida, os objetivos do desenvolvimento sustentável, os métodos de otimização e suas aplicações na indústria, o modelo da programação linear e suas aplicações e a aplicação de técnicas para a tomada de decisão com detalhamento das técnicas AHP e DEA.

2.1 Sustentabilidade

O tema da sustentabilidade vem assumindo neste novo século um papel central nas discussões que abrangem o impacto dos seres humanos sobre o meio ambiente (JACOBI, 2003). Isso tem repercutido em uma variedade de publicações e pesquisas sobre a sustentabilidade, buscando entender ou explicar esse termo como um processo ou objetivo final, trazendo consigo a tomada de consciência sobre os problemas ambientais, desigualdades sociais e crises econômicas (SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2014). Deve haver um alinhamento do objetivo da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável, considerando os aspectos ambientais, econômicos e sociais (FEIL; SCHREIBER, 2017). Neste sentido, o termo sustentabilidade tem sido conceituado como a “solução para a preservação do meio ambiente, a fim de que seja possível a manutenção da existência dos seres vivos no planeta Terra, isso, por meio de novas atitudes a serem implementadas no cotidiano de todos os indivíduos” (IAQUINTO, 2018, p. 175).

A sustentabilidade caracteriza-se como um princípio que é aplicado à sistemas, sejam, sistemas abertos que interagem com a sociedade-natureza, como sistemas industriais que abrangem transporte, produção, energia, entre outros. Os sistemas sociais, como: a urbanização, mobilidade, comunicação. Os sistemas naturais, como: solo, atmosfera, sistemas aquáticos e bióticos, etc., considerando ainda os fluxos de informações, bens, materiais e resíduos, interagindo com sistemas que estão em constante mudanças (SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2014). O termo sustentável está associado a uma solução relacionada com a degradação nas inter-relações do sistema global ambiental humano (FEIL; SCHREIBER, 2017). Sendo que a degradação ambiental e o aumento das desigualdade social tem assumido papel de destaque (JACOBI, 2003).

Neste contexto, o desenvolvimento sustentável sob aspecto social corresponde à uma melhor distribuição de renda, geração de empregos e qualidade de vida. No aspecto ambiental caracteriza o uso adequado dos recursos naturais, matérias-primas e destinação adequada dos resíduos produzidos pela ação humana (CARVALHO, 2019). Diante disso, são necessárias mudanças nos padrões mentais, culturais e comportamentais, para evitar que a sociedade e o planeta entrem em colapso (CAMPOS, 2019).

É necessário que as empresas estejam preocupadas com o meio ambiente, estejam abertas as mudanças, sejam transparentes e valorizem os aspectos sociais, para conseguir obter um crescimento sustentável (BACHA; SANTOS; SCHAUN, 2010). “A preocupação com o desenvolvimento sustentável representa a possibilidade de garantir mudanças sociopolíticas que não comprometam os sistemas ecológicos e sociais que sustentam as comunidades” (JACOBI, 2003, p. 191). Ao observarmos melhor a sustentabilidade, podemos perceber que a mesma faz parte de nossa vida, sendo viável a preservação e recuperação do meio ambiente com a realização de pequenas práticas no dia a dia (IAQUINTO, 2018).

2.2 Avaliação do ciclo de vida

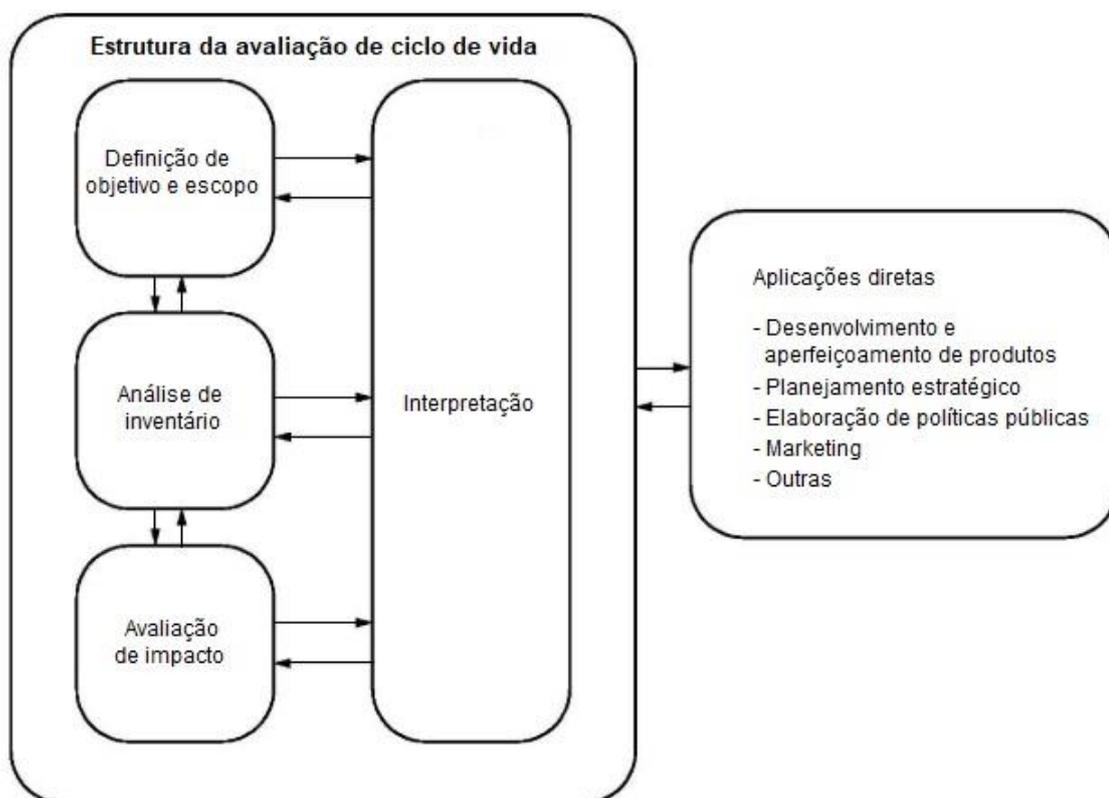
A ABNT NBR ISO 14040 (2014, p. vi), considera que a avaliação do ciclo de vida (ACV), “enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais [...] ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (isto é, do berço ao túmulo)”.

O estudo da ACV é composto por quatro fases que estão representados na Figura 1, na próxima página. Importante observar que “não existe um método único para se conduzir uma ACV. As organizações têm a flexibilidade para implementar a ACV como descrito nesta Norma, de acordo com a aplicação pretendida e com os requisitos de cada organização” (ABNT NBR ISO 14040, 2014, p. 9). Na medida em que os dados do estudo forem coletados, vários aspectos do escopo podem exigir alterações, visando contemplar ao objetivo original.

Os dados a serem associados a cada processo podem ser: a) entradas de energia, de matéria-prima, auxiliares, outras entradas físicas; b) produtos, co-produtos e resíduos; c) emissões atmosféricas, descargas para a água e solo, e d) outros aspectos ambientais (ABNT NBR ISO 14044, 2014; ABNT NBR ISO 14040, 2014). “A exclusão de estágios,

processos, entradas ou saídas do ciclo de vida é permitida apenas se não alterar as conclusões gerais do estudo”, sendo necessário justificar a omissão, quando essa ocorrer. Os dados relacionados aos processos podem conter uma diversidade de medidas, sendo estas calculadas ou estimadas. (ABNT NBR ISO 14044, 2014, p. 14).

Figura 1 - Fases de uma ACV



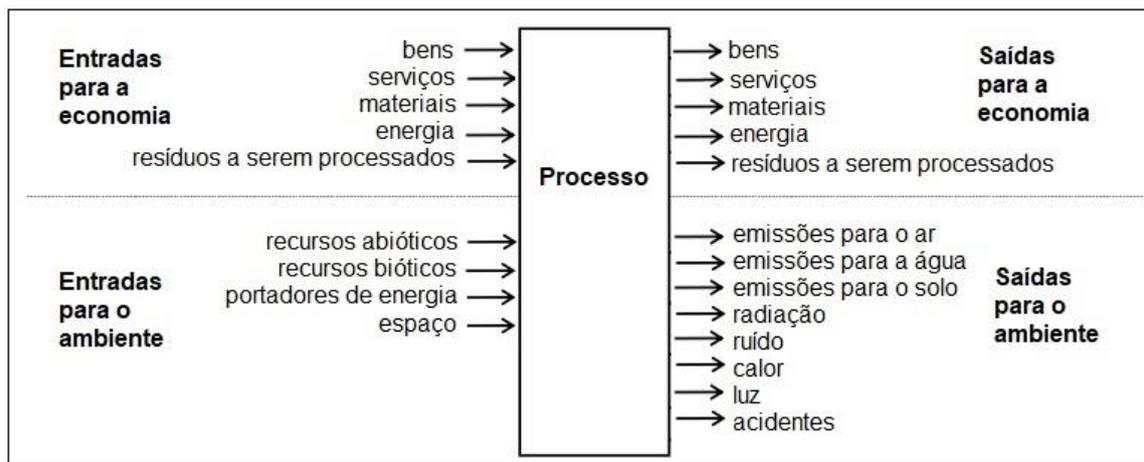
Fonte: (ABNT NBR ISO 14040, 2014, p. 8).

Os resultados da ACV podem ser subsídios úteis para uma variedade de processos decisórios. “O nível de detalhamento, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias utilizadas dependem do objetivo e escopo do estudo” (ABNT NBR ISO 14040, 2014, p. 15). Conforme a ABNT NBR ISO 14031 (2004, p. 5), “as decisões e ações da administração de uma organização estão estreitamente relacionadas com o desempenho de suas operações”, onde dentre as informações que podem ser geradas podem ser consideradas as tendências e oportunidades para melhorar o gerenciamento de seus aspectos ambientais, como a prevenção à poluição.

A seguir, a Figura 2 representa os fluxos de entrada econômico e ambiental de um processo produtivo econômico. As categorias de insumos e produtos precisam ser

colocadas de forma simétrica para a entrada econômica, sendo eles definidos em cinco tipos: bens, serviços, materiais, energia e resíduos a serem processados. Importante observar que a distinção entre esses cinco tipos nem sempre está claramente definida (HEIJUNGS *et al.*, 1992).

Figura 2 – Representação do processo econômico definido em função da dimensão econômica e ambiental



Fonte: adaptado de (HEIJUNGS *et al.*, 1992, p. 31).

A ABNT NBR ISO 14044 (2014), também recomenda realizar uma análise de sensibilidade em cima dos resultados mais significativos. Esta análise pode ser através da comparação entre as demandas de insumos, representando em forma percentual a variação de um insumo entre dois processos, por exemplo: identificar variações superiores a 10% nos resultados.

A verificação da consistência, também é importante para “determinar se os pressupostos, métodos, modelos e dados são consistentes ao longo do ciclo de vida de um produto ou entre várias opções” (ABNT NBR ISO 14044, 2014, p. 44). As inconsistências representam as diferenças existentes entre: fontes de dados, precisão dos dados, na cobertura tecnológica, cobertura temporal, idade dos dados e na cobertura geográfica. Também é fundamental considerar que mudanças nos indicadores de condição ambiental podem fornecer para as organizações informações sobre a condição do meio ambiente e os produtos, serviços e atividades, sendo possível demonstrar possíveis correlações entre esses fatores (ABNT NBR ISO 14031, 2004).

As organizações com grande poder de influência costumam tomar mais cuidado com a qualidade de suas decisões, sendo adequado o uso da transparência nas ações que

podem gerar impactos na sociedade, na economia e no meio ambiente (ABNT NBR ISO 26000, 2010). É necessário entender a organização e os seus contextos, interno e externo, como: fatores sociais, econômicos e ambientais, entre outros. As empresas podem se utilizar de uma estrutura para a gestão de riscos, apropriada para reduzir a incerteza na tomada de decisão ou assegurar que sejam tratados de forma adequada as mudanças ou incertezas, visando contribuir para o alcance dos objetivos, considerando também as consequências e percepções para as partes interessadas (ABNT NBR ISO 31000, 2018).

2.3 Avaliação da sustentabilidade no ciclo de vida

A avaliação da sustentabilidade no ciclo de vida (*Life Cycle Sustainability Assessment - LCSA*) é uma metodologia que possibilita a representação detalhada das tecnologias empregadas nos processos sob uma perspectiva do ciclo de vida, permitindo a avaliação da sustentabilidade em três diferentes perspectivas, que são: a ambiental, econômica e social, conhecido também como conhecidos como *triple bottom line* (LU; KUDARAVALLI; GEORGIU, 2018; WULF *et al.*, 2018).

O conceito de *Triple bottom line* foi criado pelo sociólogo britânico John Elkington em 1994, onde o autor apresentou ferramentas concretas para que empresas possam se comprometer com os valores do desenvolvimento sustentável. Neste contexto as empresas passam a ter um papel central, onde precisam ser mais responsáveis pelas suas ações, desenvolvendo vantagens competitivas sustentáveis. Da mesma forma a legislação também terá um papel importante para ajudar as empresas a responder as questões de sustentabilidade. Iniciativas internacionais podem contribuir para o desenvolvimento de uma visão prospectiva (VISSER; ELKINGTON, 2013).

Considera-se que os quatro estágios principais do ciclo de vida dos produtos (pré-fabricação, fabricação, uso e pós-uso) podem ter diferentes impactos sobre a sustentabilidade geral do produto (HAPUWATTE *et al.*, 2016). A dificuldade de fabricação é geralmente proporcional à complexidade geométrica, assim como a mudança no material também pode gerar alteração no processo (YANG *et al.*, 2017). Alguns estudos que abrangem a sustentabilidade na fabricação de produtos e as métricas utilizadas estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Síntese de estudos sobre sustentabilidade

Objeto de Estudo	Métricas utilizadas	Autores
Fabricação de componente mecânico utilizado em um produto eletrônico	Métricas especificadas diretamente no Índice de sustentabilidade do produto (ProdSI - <i>Product Sustainability Index</i>).	(HAPUWATTE <i>et al.</i> , 2016)
Produção de Toalhas de papel	Métricas integradas: gases de efeito estufa, critérios de poluentes do ar, uso da terra para madeira e uso de combustíveis fósseis.	(INGWERSEN <i>et al.</i> , 2016)
Consolidação de peças com uso da manufatura aditiva	Impacto ambiental, consumo de energia e impacto na saúde.	(YANG <i>et al.</i> , 2017)
Fabricação de componentes com usinagem criogênica	Fluxos de energia e material, consumo de energia, emissão de gases de efeito estufa (GEE), fluxos de resíduos, consumo de água, custos de mão-de-obra, material, ferramenta de corte, refrigerante e capital da máquina-ferramenta.	(LU; KUDARAVALLI; GEORGIU, 2018)
Produção do hidrogênio	Foram interligados (analisados) os 17 ODS com 54 indicadores do LCSA.	(WULF <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 1, está contido a síntese do trabalho que comparou a sustentabilidade na fabricação de toalhas de papel, considerando duas linhas de fabricação distintas, o qual concluiu que as toalhas fabricadas na linha de produção mais avançada são mais sustentáveis comparada a linha de produção mais antiga (INGWERSEN *et al.*, 2016).

Para a produção do hidrogênio, constatou-se que a Áustria tem os menores impactos ambientais, principalmente sob o aspecto da geração de energia elétrica, devido a sua alta utilização de hidrelétricas em comparação a Espanha e Alemanha. O estudo demonstrou quais os problemas que podem ocorrer na utilização de indicadores, interligando os indicadores do LCSA aos ODS, e a partir desses foi feita a análise dos indicadores comuns e como se comportam em relação a produção de hidrogênio. Percebeu-se que a LCSA pode se utilizar das diretrizes dos ODS para o estabelecimento de indicadores, entretanto é necessário cuidado pois os ODS são direcionados para países ou regiões, enquanto o LCSA objetiva avaliar os impactos ambientais das tecnologias ou produtos (WULF *et al.*, 2018).

Outro estudo demonstra os benefícios potenciais do uso da tecnologia envolvendo um centro de usinagem horizontal equipado com resfriamento convencional de inundação e um sistema de usinagem criogênico, sendo realizada a comparação entre os dois processos de usinagem considerando uma peça de liga de titânio. O ciclo de vida do líquido refrigerante utilizado na fabricação abrange um cenário do berço ao túmulo. Os fatores de impacto ambiental foram definidos como: a emissão de gases de efeito estufa

(GEE), os fluxos de resíduos em ambas as formas (líquido e sólido na forma de sucata) e o consumo de água. Também foram medidos os fatores de custo e energia. O comparativo de resultados demonstra uma ampla vantagem na maioria dos aspectos de sustentabilidade que foram analisados em relação à usinagem criogênica (LU; KUDARAVALLI; GEORGIU, 2018).

Outro estudo identificou a mudança de sustentabilidade na alteração de processo de um conjunto de peças, utilizando a consolidação de peças (*Part consolidation* - PC) com uso da manufatura aditiva (*additive manufacturing* - AM). O componente estudado foi a fixação de piso em um trem subterrâneo. Foi avaliado apenas o impacto no estágio de fabricação e montagem, a jusante do ponto de vista do ciclo de vida, observando-se os benefícios da consolidação de peças como: isento de solda, percurso menor no processo e redução de peso. Dentre os resultados obtidos, constatou-se a redução no consumo de energia, redução no impacto ambiental durante a fase de fabricação, mas foi verificada maior toxicidade para a saúde humana, problema esse que está relacionado ao processo estudado (YANG *et al.*, 2017). Pode-se complementar com o estudo onde constatou-se que os produtos fabricados por manufatura aditiva podem ser mais sustentáveis do que os fabricados por manufatura convencional, desde que os componentes tenham uma geometria complexa (HAPUWATTE *et al.*, 2016).

2.3.1 Objetivos do desenvolvimento sustentável

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, o planeta e a prosperidade, onde foram estabelecidos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) desdobrados em 169 metas e 232 indicadores. Esses objetivos são considerados os mais importantes na esfera global atualmente, são considerados integrados, indivisíveis e universais que visam equilibrar as três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômico, social e ambiental (UNITED NATIONS, 2015; WULF *et al.*, 2018). Os ODS estão demonstrados na Figura 3.

Figura 3 – Objetivos do desenvolvimento sustentável

<p>Objetivo 1. Acabar com a pobreza em todas as suas formas em todos os lugares</p> <p>Objetivo 2. Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável</p> <p>Objetivo 3. Garantir uma vida saudável e promover o bem-estar para todos em todas as idades</p> <p>Objetivo 4. Garantir uma educação de qualidade inclusiva e equitativa e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos</p> <p>Objetivo 5. Alcançar a igualdade de gênero e capacitar todas as mulheres e meninas</p> <p>Objetivo 6. Garantir a disponibilidade e o gerenciamento sustentável da água e saneamento para todos</p> <p>Objetivo 7. Garantir acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos</p> <p>Objetivo 8. Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos</p> <p>Objetivo 9. Construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável e promover a inovação</p> <p>Objetivo 10. Reduzir a desigualdade dentro e entre países</p> <p>Objetivo 11. Tornar cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis</p> <p>Objetivo 12. Garantir padrões sustentáveis de consumo e produção</p> <p>Objetivo 13. Tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos *</p> <p>Objetivo 14. Conservar e usar de forma sustentável os oceanos, mares e recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável</p> <p>Objetivo 15. Proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerenciar florestas de forma sustentável, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade</p> <p>Objetivo 16. Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, fornecer acesso à justiça para todos e construir instituições efetivas, responsáveis e inclusivas em todos os níveis</p> <p>Objetivo 17. Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a Parceria Global para o Desenvolvimento Sustentável</p> <p>* Reconhecendo que a Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas é o principal fórum intergovernamental internacional para negociar a resposta global às mudanças climáticas.</p>

Fonte: adaptado de (UNITED NATIONS, 2015, p.14).

De uma forma geral existe coerência nas políticas futuras e daquelas que são colocadas pela Agenda 2030. A agenda básica do desenvolvimento sustentável beneficiará as políticas futuras buscando: manter uma interconexão coerente entre os objetivos, as metas e os indicadores; reconhecer as dimensões da sustentabilidade além das fronteiras dos países; construir um compartilhamento de objetivos que funcionem mesmo em países diferentes entre si; promover esforços no desenvolvimento de indicadores que sejam fortes com os princípios de sustentabilidade e os avanços da ciência e governança (COSCIEME *et al.*, 2020).

As Nações Unidas reafirmam um compromisso de plena implementação da Agenda 2030, com o envolvimento global no apoio à implementação de todos os objetivos e metas, reunindo governos, sociedade civil, setor privado e outros atores, operando nos níveis

global, nacional e regional, promovendo o intercâmbio das melhores práticas e aprendizado mútuo (UNITED NATIONS, 2015).

2.3.1.1 ODS9 – Indústria, inovação e tecnologia

Dentre os principais pilares impulsionadores da sociedade moderna e do desenvolvimento sustentável, estão a manufatura, a infraestrutura e os avanços tecnológicos (AKINAGA, 2019; FILHO *et al.*, 2019). Considera-se que o desenvolvimento das tecnologias de fabricação proporcionou uma revolução nos mais diversos campos, diante disso, o ODS9, visa promover a industrialização inclusiva e sustentável, com foco em tecnologia, inovação e infraestrutura sustentável.

Entretanto a redução da biodiversidade e o esgotamento dos recursos naturais e demais mudanças climáticas (forças antrópicas) estão degradando os serviços ecossistêmicos que fornecem alimentos e outros recursos. No mundo dos negócios a resiliência empresarial é vista como a capacidade de uma empresa sobreviver, conseguir se adaptar e crescer diante de mudanças turbulentas (FIKSEL, 2006). Considerando o ponto de vista de resiliência ecológica, esse conceito representa a capacidade adaptativa, que pode levar a novos equilíbrios (CARPENTER *et al.*, 2001).

As estratégias para melhorar a resiliência ecológica incluem ampliar o conhecimento sobre a ecologia local, preparar as pessoas para que consigam lidar com mudanças e incertezas, utilizar práticas de gestão adaptativas que integram o monitoramento, adaptação e mitigação e construir redes de colaboração entre a sociedade e os pesquisadores (FIKSEL, 2006). A industrialização inclusiva consiste em aumentar a participação industrial nos países menos desenvolvidos, visando com isso promover a ampliação nos empregos e aumentar o PIB (Produto Interno Bruto), de acordo com as particularidades de cada país. Também é importante pactuar as inovações tecnológicas, a eficiência e o respeito ao meio ambiente (SIMEONOVSKI; KAFTANDZIEVA; BROCK, 2021; SONG; ZHANG; CAO, 2016).

Em 2011 uma pesquisa realizada pelo MIT/*Sloan Management*, com 2.874 gerentes e executivos de 113 países, revelou que dois terços dos entrevistados relataram que a sustentabilidade era criticamente importante para a empresa ser competitiva no mercado atual. Um aumento de 55% em relação ao mesmo estudo feito no ano anterior. As

principais empresas estão adicionando em seu quadro o diretor de sustentabilidade, visando proteger o valor de sua marca (YATES, 2012).

O CEO da gigante de alumínio Alcoa, Klaus Kleinfeld, disse que: "a sustentabilidade agora deve estar na agenda de todos, e isso representa uma mudança fundamental" (YATES, 2012, p. 12). A sustentabilidade passa a ser incorporada nas instituições de ensino superior, nas salas dos diretores de corporações e na política e órgãos governamentais. Assim, tanto no setor público quanto no privado, os ODS podem ser utilizados para auxiliar a implementação de estratégias para o desenvolvimento sustentável (FILHO *et al.*, 2019). O desenvolvimento sustentável requer coerência e ações políticas de várias áreas, exigindo um alinhamento dos objetivos com as iniciativas políticas de sustentabilidade (COSCIEME *et al.*, 2020).

Dentre o que está descrito para as metas no ODS9, muitas voltam-se para os países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, onde consta: aumentar significativamente a participação da indústria no emprego e no produto interno bruto; atualizar e modernizar a indústria e sua infraestrutura para que ela seja sustentável, com processos produtivos limpos e ambientalmente corretos; aprimorar a pesquisa e a capacidade tecnológica nos setores industriais (UNITED NATIONS, 2015).

Uma das perspectivas apontadas considerando o ODS9, observa-se no desenvolvimento da IoT (Internet das Coisas) e das tecnologias, como exemplo a nanofabricação, que possibilitará um aumento das perspectivas dos clientes com a fabricação sob encomenda. Esse modelo de produção também será uma tendência dos fabricantes (AKINAGA, 2019). Outro estudo que aponta o uso de novas tecnologias, referente ao uso do *presetter* de ferramentas, equipamento pouco difundido dentro das indústrias brasileiras. Nesse estudo foram avaliados os aspectos tempo de processamento e produtividade do equipamento em uma indústria metalmeccânica, obtendo-se uma estimativa média de 74,1% de redução do tempo na colocação e correção das ferramentas nas máquinas CNC, aumentando o tempo disponível de operação e melhorando a rotina de trabalho dos operadores e programadores (GROSS *et al.*, 2019).

2.4 Otimização

Os processos de otimização de recursos podem ser aplicados em diversas áreas, em decorrência da escassez de produto, matéria-prima, ou pela dificuldade de produção, por exemplo. Neste sentido é necessário empregar os recursos de forma mais eficiente e eficaz, maximizando ou minimizando uma quantidade (custo, receita, número de produtos, entre outros), denominada de objetivo, que depende de um ou mais recursos escassos (LACHTERMACHER, 2018).

As indústrias modernas trabalham com um grande volume de dados e informações, as quais podem ser utilizadas em modelos de otimização, para conseguir obter melhores resultados. Isto possibilita que as empresas possam utilizar plenamente os dados, mesmo que alguns métodos ainda não possibilitem tal uso, devido aos desafios da filtragem, limpeza e armazenagem dos dados (JI; YIN; WANG, 2019). Também é necessário integrar as restrições do processo com o modelo de otimização selecionado tornando o método viável e confiável (SUN; WANG; LU, 2019; WU; ZENG; HUANG, 2018).

Nos resultados obtidos com o uso dos métodos de otimização se percebe uma melhora nos resultados obtidos, realidade e teórico, devido a melhoria no desempenho dos computadores e da pesquisa em algoritmos (SUN; WANG; LU, 2019). Também é importante a eficiência e robustez computacional para que seja possível trabalhar com um produto de geometria bastante complexa (MOLE; CAFUTA; ŠTOK, 2013). Assim, o uso do recurso computacional pode realizar o cálculo da otimização, para orientar o processo de produção em tempo real, sendo possível obter resultados previstos próximos aos valores reais e projetar tendências futuras (SAMATTAPAPONG; AFZULPURKAR, 2016).

2.4.1 Aplicação dos estudos de otimização

A pesquisa referente a aplicação dos estudos de otimização foi realizada em duas bases de dados: Scopus e Web of Science. Ambas as bases de dados possibilitam a tabulação dos dados com o uso do Bibliometrix (2019). Na base de dados da Scopus, foram utilizados os termos de busca na primeira palavra: ("*optimization in industry*" OR "*optimization industry*" OR "*optimization methods applied in industry*" OR "*optimization methods*"). Após foi inserido termo de busca na segunda palavra: ("*process*" AND "*industry*" AND "*optimization*" AND "*optimization methods*"). Em

seguida foram selecionados os filtros: *subject area engineering, language english and open access*, resultando em 162 artigos e *papers*.

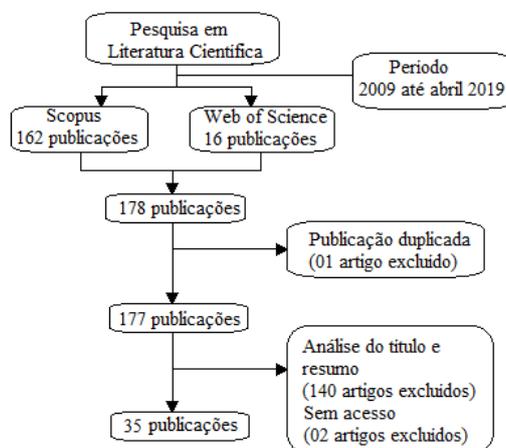
Na base de dados da Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics), foram utilizados os mesmos termos de busca, porém com todos eles inseridos no campo de busca inicial: ("*industrial process*" OR "*optimization in industry*" OR "*optimization industry*" OR "*optimization methods applied in industry*" OR "*optimization methods*") AND ("*process*" AND "*industry*" AND "*optimization*" AND "*optimization methods*"), resultando em 16 artigos e *papers* de publicações relevantes. Foi selecionado também o filtro: *open access*.

O uso do operador "AND" nas pesquisas de banco de dados indica que ambos os termos devem aparecer nas publicações. Por exemplo, uma pesquisa por "*process*" AND "*industry*" produziria documentos que incluam todos esses conceitos. Enquanto isso, quando "OR" é usado, pelo menos um dos termos deve aparecer, por exemplo, "*industrial process*" OR "*optimization in industry*". Foi realizada a pesquisa das combinações desses termos nos títulos, resumos e palavras-chave.

Ao todo foram localizadas 178 publicações, sendo 162 publicações da Scopus e 16 publicações da Web of Science - Coleção Principal (Clarivate Analytics). Após foram verificados os artigos duplicados, sendo excluída 1 publicação. Com 177 publicações foram realizadas as análises do título e resumo, sendo excluídos mais 140 artigos e mais 2 artigos sem acesso livre, restando um portfólio de 35 publicações.

A Figura 4 representa o processo de seleção da literatura, seguindo como base a metodologia utilizada por Visentin *et al.* (2019).

Figura 4 - Mapeamento do processo de seleção do portfólio da literatura científica



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta a síntese dos métodos de otimização e modelos computacionais aplicados na indústria, com base na literatura pesquisada.

Tabela 2 – Síntese dos métodos de otimização e modelos computacionais e aplicados na indústria

Modelos e métodos	Objetivo	Aplicação/Produto	Autores
ACO (Algoritmo de Colônia de Formigas)	Planejamento automático de sequenciamento de perfuração e rebiteagem realizada pelo equipamento rebitorador.	Painel de aeronaves de grande porte.	(HONG <i>et al.</i> , 2010)
GA (Algoritmo Genético)	Minimizar a tensão máxima (σ_{max}) que ocorre perto do furo ou da interface de duas seções.	Placa com furo central e um feixe com cinco camadas de materiais.	(TANG; BASSIR; ZHANG, 2011)
GA	Determinar a condição ideal de usinagem para maximizar a taxa de remoção de metal e minimizar a rugosidade da superfície.	Usinagem de compósitos híbridos de alumínio.	(DHAVAMANI; ALWARSAMY, 2012)
GA	Aumentar o rendimento global de uma célula de manufatura, com base nos critérios de utilização dos equipamentos, sequenciamento da produção, estoque em processo e agendamentos das atividades de manutenção.	Célula de manufatura de fabricação de semicondutores.	(LEE; NI, 2012)
GA	Minimizar o volume de ocupação de caixas no interior de um contêiner (otimização de empacotamento).	Colocação de caixas no interior de um contêiner.	(HU; LI; TSAI, 2012)
FE (Elementos Finitos)	Minimizar o número de fases de operação envolvidas no processo de conformação de uma peça metálica de alumínio.	Processo de conformação de chapa de alumínio de 1mm de espessura.	(MOLE; CAFUTA; ŠTOK, 2013)
PS (Algoritmo de Busca de Padrões)	Resolver problemas de otimização de usinagem para minimizar a rugosidade superficial.	Usinagem de jato de água abrasivo, torneamento, fresamento, furação, usinagem de descarga elétrica e descarga elétrica de fio.	(MADIĆ; RADOVANOVIĆ, 2014)
PAINT e NIMBUS	Diminuir o custo de investimento e melhorar a qualidade do papel no nível do projeto e, ao mesmo tempo, garantir o bom desempenho do sistema de produção.	Dosar a polpa e água das torres de armazenamento ao processo de fabricação de papel.	(STEPONAVIČE; RUUSKA; MIETTINEN, 2014)
SA (<i>Simulated Annealing</i>)	Resolver simultaneamente o problema de balanceamento de linha, seleção de equipamentos e dimensionamento de <i>buffers</i> , considerando a capacidade e o custo.	Linha de montagem híbrida.	(OESTERLE; BAUERNHANSL; AMODEO, 2016)
SVR (Regressão por Vetores-suporte) e NSGA-II (Algoritmo Genético de Classificação Não Dominado)	Minimizar a deformação geral de uma peça de chapa metálica e minimizar a deformação máxima de forma síncrona.	Fuselagem de aeronave.	(YANG <i>et al.</i> , 2017)
ACO	Gerar um cronograma de produção que minimize o tempo total de processamento das peças em um ambiente automatizado de <i>job shop</i> .	Equipamento automatizado de <i>job shop</i> .	(PAKPAHAN; KRISTINA; SETIAWAN, 2017)
GA	Minimização do volume do trem de engrenagens sob aspecto de posicionamento dos eixos do eixo.	Trens de engrenagens retas.	(MARJANOVIĆ <i>et al.</i> , 2017)
PSO	Propor um método de integração para otimizar os parâmetros de homogeneidade e deformação na rebiteagem de juntas de chapas	Rebiteagem de juntas de chapas em aeronaves.	(WANG <i>et al.</i> , 2017)
ACO e GA	Propor um método de otimização simultânea para uma rota ótima de tubos e cabos.	Projeto de <i>layout</i> de tubos e cabos.	(SHIRAKAWA; ARAKAWA, 2018)
GA	Apresentar uma abordagem de projeto e otimização de módulos para um sistema de montagem inteligente.	Processo de projeto de sistemas de micro-montagens.	(SHAO <i>et al.</i> , 2018)
SIMP (Método de Interpolação de Densidade)	Determinar a forma do contorno externo de uma estrutura de conexão.	Estrutura de conexão do barramento de liga de alumínio em carroceria de ônibus.	(PENG <i>et al.</i> , 2018)
QRSM (Modelo de Superfície de Resposta Quadrática), KRG (krigagem), RBF (<i>Radial Basis Function</i>) e ASA	Reduzir o espaço de projeto, para obter o espaço de otimização do valor final ideal.	Projeto da mola de compressão / tensão (Projeto Industrial).	(RAN; LI; LI, 2018)

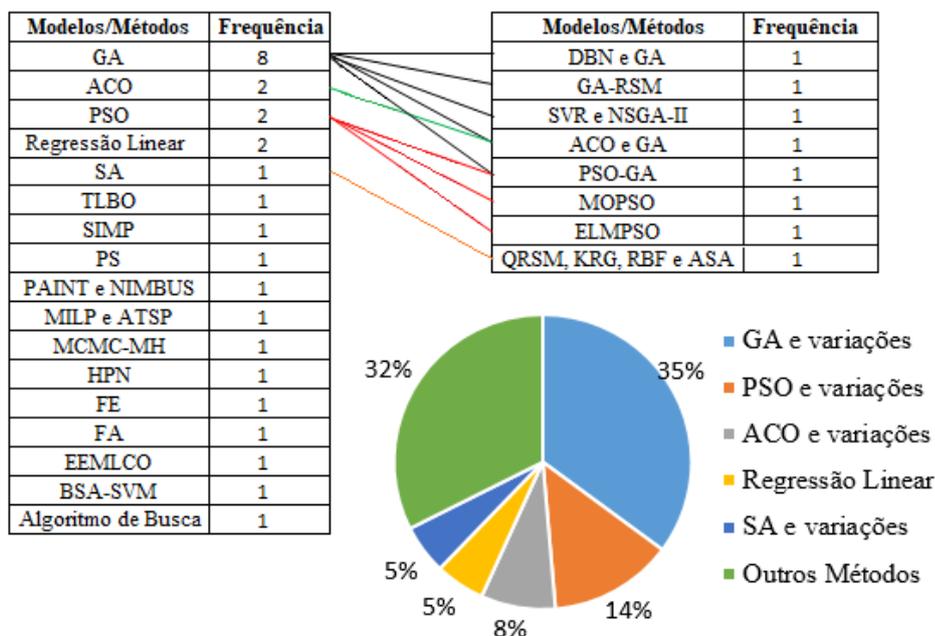
<i>(Adaptive Simulated Annealing)</i>			
ELMPSO (<i>Extreme Learning Machine</i> com o Algoritmo de Enxame de Partículas)	Reduzir a intervenção humana na seleção de parâmetros ótimos de corte para a operação de torneamento CNC.	Torneamento com máquina CNC.	(JANAHIRAMAN; AHMAD; NORDIN, 2018)
TLBO (<i>Teaching Learning Based Optimization</i>)	Melhorar a qualidade superficial e características de produtividade na usinagem.	Liga de titânio Ti-6Al-4V, usinada em jato de água abrasivo.	(SHARMA <i>et al.</i> , 2018)
EEMLCO (Modelo de Otimização Colaborativa de Vários Níveis com Eficiência Energética)	Realizar uma otimização abrangente no desempenho da eficiência energética.	Sistemas de manufatura robótica (RMSs) para a montagem de uma carroceria de um veículo.	(XU <i>et al.</i> , 2018)
PSO-GA	Resolver o problema de planejamento de processos assistidos por computador considerando várias restrições de precisão especificadas no projeto.	Planejamento do processo de usinagem de uma peça.	(WU; ZENG; HUANG, 2018)
GA-RSM (Algoritmo Genético e Sistemas de Manufatura Robótica)	Atingir a força máxima de tração e resistência final nas soldagem por fricção de ligas de alumínio.	Soldagem por fricção de ligas de alumínio 2024 e 5050	(MEHRI KHANSARI <i>et al.</i> , 2018)
GA	Reduzir a vibração da estrutura e manter a eficiência de trabalho do Robô Delta.	Robô Delta, o movimento de <i>pick and place</i> (PPM) e a vibração da estrutura.	(CHENG; LI, 2018)
MCMC-MH (Algoritmo MetropolisHastings da Cadeia de Markov em Monte Carlo)	Analisar o comportamento anisotrópico de quatro diferentes amostras de chapa de aço de alta resistência.	Chapas de aço: DP600, TRIP 780, 590 HSS e 980 Y HSS, com espessura nominal de 1,5mm.	(SARRAF; GREEN, 2018)
FA (Algoritmo de Colônia de Vaga-lumes)	Calcular a confiabilidade e a otimização do processo de fabricação de flanges de aço.	Flanges de aço utilizados em tubulações.	(NOUR-EDDINE M'HAOUACHE <i>et al.</i> , 2019)
MOPSO (Algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas Multiobjetivo)	Propor um método de otimização multiobjetivo para o teste de degradação por estresse constante (CSADT), que combina: a precisão do ajuste e a precisão da previsão.	Conector elétrico.	(WU <i>et al.</i> , 2019)
GA	Melhorar a precisão do projeto de confiabilidade das engrenagens cônicas.	Trens de engrenagens cônicas.	(SUN; WANG; LU, 2019)
DBN (Algoritmo Híbrido de <i>Deep Belief Networks</i>) e GA	Propor um método de otimização baseado em análise de big data para o planejamento de processos considerando a seleção de máquinas-ferramenta, seleção de ferramentas.	Máquinas-ferramenta, ferramentas de corte e a condição de usinagem.	(JI; YIN; WANG, 2019)
PSO	Otimizar os parâmetros do controlador proporcional-integral (PI) para obter cinco estratégias de ajuste de peso de inércia.	O motor mecatrônico <i>brushless current</i> (DC).	(XIE; WANG; WANG, 2019)
BSA-SVM (Algoritmo <i>Backtracking Search e Support Vector Machine</i>)	Diagnosticar falhas de engrenagens helicoidais.	Caixa de engrenagens.	(THAI <i>et al.</i> , 2019)
HPN (Redes de Petri Híbridadas)	Modelar a produção de aço, para obter a eficiência energética e o excedente de gás.	Fabricação do ferro e aço em uma indústria siderúrgica	(WANG <i>et al.</i> , 2013)
Regressão Linear	Fornecer um plano ótimo de produção das linhas de montagem, com otimização de custos que determinem os tamanhos dos lotes, as datas de lançamento e os requisitos de capacidade.	Sistemas de produção em múltiplos estágios.	(GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017)
Algoritmo de busca	Desenvolver um modelo de suporte à decisão para explorar um problema de tempo de fabricação.	Sistemas de produção em lotes.	(CHIU <i>et al.</i> , 2018)
Regressão Linear	Determinar a estrutura da política de produção ótima, considerando o custo, reserva de capacidade, preço e nível de estoque.	Cadeias de Suprimento.	(HUANG; LIN; WEI, 2018)
MILP (Programação Linear Inteira Mista) e ATSP (Problema Assimétrico do Caixeiro Viajante)	Resolver o problema de programação do fluxo de espera <i>no-wait</i> com restrições de data de vencimento.	26 problemas de teste, dos quais cada um envolve 04 datas de vencimento.	(YING; LU; LIN, 2018)

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 5 representa os tipos de modelos e métodos utilizados e as suas variações. O método GA foi o mais utilizado (35%), sendo utilizado 8 vezes de forma isolada e com mais 5 combinações. O método PSO foi utilizado (14%) sendo 2 vezes de forma isolada e

com 3 combinações. O ACO foi utilizado (8%) sendo 2 vezes de forma isolada e com 1 combinação. A Regressão Linear e o SA foram utilizados (10%). O percentual utilizado nos trabalhos dos demais métodos é de 32%.

Figura 5 - Representatividade na utilização dos métodos e modelos



Fonte: elaborado pelo autor.

2.4.2 Aplicação da otimização e tipo de indústria

A síntese da aplicação dos estudos de otimização e dos tipos de indústrias onde foram realizadas as pesquisas ou experimentos, estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3 – Métodos de otimização e tipos de indústria onde foram aplicados os estudos

Método de Otimização	Tipo de Indústria	Autores
ACO, EEMLCO, GA, FA, MCMC-MH, BSA-SVM, PSO, Regressão Linear, SVR e NSGA-II	Indústria automotiva, aeronáutica e de manufatura (fabricação)	(CHENG; LI, 2018; GYULAI; PFEIFFER; MONOSTORI, 2017; HONG <i>et al.</i> , 2010; NOUR-EDDINE M'HAOUACHE <i>et al.</i> , 2019; SARRAF; GREEN, 2018; THAI <i>et al.</i> , 2019; WANG <i>et al.</i> , 2013, 2017; XU <i>et al.</i> , 2018; YANG <i>et al.</i> , 2017)
GA, PS, ACO, ELMPSO, TLBO, PSO-GA, DBN e GA	Processo de usinagem	(DHAVAMANI; ALWARSAMY, 2012; JANAHIRAMAN; AHMAD; NORDIN, 2018; JI; YIN; WANG, 2019; MADIĆ; RADOVANOVIĆ, 2014; PAKPAHAN; KRISTINA; SETIAWAN, 2017; SHARMA <i>et al.</i> , 2018; WU; ZENG; HUANG, 2018)
GA, QRSM e KRG e RBF e	Indústria em geral	(MARJANOVIĆ <i>et al.</i> , 2017; RAN; LI; LI, 2018; SHAO <i>et</i>

ASA, GA, MILP e ATSP		<i>al.</i> , 2018; SUN; WANG; LU, 2019; YING; LU; LIN, 2018)
GA, MOPSO	Fabricação de semicondutores, fabricação de fios sintéticos, Indústria de conectores elétricos	(LEE; NI, 2012; WU <i>et al.</i> , 2019)
HPN, Regressão Linear	Indústria siderúrgica	(HUANG; LIN; WEI, 2018; WANG <i>et al.</i> , 2013)
GA	Projeto de estruturas	(TANG; BASSIR; ZHANG, 2011)
GA	Distribuição, logística	(HU; LI; TSAI, 2012)
FE	Processo de conformação	(MOLE; CAFUTA; ŠTOK, 2013)
PAINT e NIMBUS	Indústria do papel	(STEPONAVIČĚ; RUUSKA; MIETTINEN, 2014)
SA	Linha de montagem híbrida	(OESTERLE; BAUERNHANSL; AMODEO, 2016)
ACO e GA	Usina termelétrica	(SHIRAKAWA; ARAKAWA, 2018)
SIMP	Fábrica de ônibus	(PENG <i>et al.</i> , 2018)
GA-RSM	Indústria do alumínio	(MEHRI KHANSARI <i>et al.</i> , 2018)
PSO	Indústria de motores	(XIE; WANG; WANG, 2019)
Algoritmo de busca	Indústria fabricação em lotes	(CHIU <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: elaborado pelo autor.

As três áreas que onde mais foram realizados estudos de otimização, foram: a indústria automotiva, aeronáutica e de manufatura (fabricação) com 10 trabalhos, o processo de usinagem com 7 trabalhos e a indústria em geral com 5 trabalhos. Essas três áreas abrangem ao todo 62,8% dos trabalhos realizados.

2.5 Programação Linear

A programação linear (PL) surgiu por volta de 1950, onde a palavra programação consistia em um termo militar, que se referia aos cronogramas de treinamento e fornecimento logístico. A palavra linear se referia à planos viáveis que apresentavam restrições, podendo ser também medido o seu custo. Atualmente, a formulação de problemas de PL é utilizada nas mais diversas áreas econômicas, como: transportes, indústria, agricultura, preços das matérias-primas e produtos finais, entre outros (MATOUŠEK; GÄRTNER, 2007; VANDERBEI, 2020).

Vários problemas do mundo real podem ser modelados com o uso da PL, porém há aqueles em que as variáveis são restritas à números inteiros, denominados de programação linear inteira (PLI). Ainda há variáveis que podem assumir valores reais, denominado de programação linear inteira mista (PLIM) (VANDERBEI, 2020). Como exemplos da PLIM, tem-se o caso do *barman* que precisa encontrar a combinação ideal de bebidas para maximizar sua receita, na aplicação para os limites de tempo na cadeia de suprimentos, no

suporte ao planejamento da capacidade produtiva, no sequenciamento de produtos e quantidade de pessoal em linhas de montagens paralelas (GAMRATH *et al.*, 2019; GUENIN; KÖNEMANN; TUNÇEL, 2018; HUKA *et al.*, 2021).

Várias pesquisas também têm demonstrado a aplicação da PL para a minimização dos impactos ambientais, dentre os assuntos mais trabalhados está a substituição de combustíveis fósseis e o uso de energias renováveis (BARBOSA; GOMES, 2015; CHOI; AHN; CHOI, 2020; HAGSPIEL *et al.*, 2014). Também se observa uma maior preocupação rumo ao equilíbrio nos três pilares da sustentabilidade, em decorrência de uma maior cobrança nas políticas ambientais e aumento da consciência social (VALLERIO *et al.*, 2015).

Diante desse cenário, levando em consideração a importância na aplicação da PL na indústria, este subcapítulo tem como objetivo avaliar os desafios na aplicação da PL, os aspectos positivos e negativos das aplicações relacionadas aos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), além de apresentar as perspectivas e oportunidades nesta área. A principal contribuição desta revisão é debater as lacunas e as possibilidades da aplicação da PL e as questões de sustentabilidade e impacto das diversas atividades, principalmente industriais.

2.5.1 Metodologia revisão bibliométrica e sistemática sobre programação linear

O estudo consiste em uma revisão bibliométrica, elaborada para apresentar o cenário do estado atual do conhecimento sobre a aplicação da programação linear na indústria, baseado em uma revisão do “estado da arte”. A metodologia teve como referência o estudo realizado por (NAZARI *et al.*, 2020). Foram utilizados os métodos de revisão bibliométrica e sistemática, sendo possível identificar um histórico de pesquisas relacionadas ao tema, sua aplicação na indústria e identificar tendências na área. O trabalho responder as seguintes questões de pesquisa:

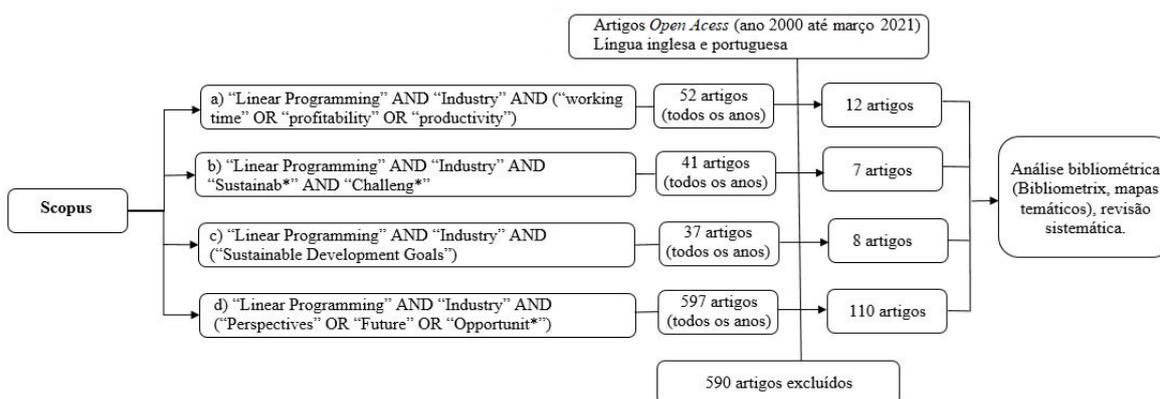
- a) Quais são as aplicações com o uso da programação linear na indústria que abrangem: o tempo de trabalho, lucratividade e produtividade?
- b) Quais são os desafios observados na aplicação da programação linear na indústria?
- c) Quais os aspectos positivos e negativos de trabalhar os objetivos do 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 utilizada a base de dados da Scopus para a realização da revisão, pois apresenta um maior número de publicações referentes as palavras-chaves pesquisadas. Na seleção dos artigos foram inseridos 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 encontrar os termos de interesse no título, resumo e palavras-chaves, foram utilizados operadores booleanos. Foi selecionado também o filtro: *open acess*. Este procedimento de busca também foi realizado na revisão que abrange o conteúdo das técnicas AHP e DEA, subcapítulos 2.6.1.1 e 2.6.2.1, onde apenas foram substituídas as palavras “*Linear Programming*” por “*Analytic Hierarchy Process*” e “*Data Envelopment Analysis*” respectivamente.

Foi realizada uma análise de conteúdo e bibliométrica nos artigos encontrados na base de dados sobre o uso da programação linear na indústria, abrangendo o tempo de trabalho, lucratividade, produtividade. Ainda são apresentados os desafios e limitações, avaliando as perspectivas, oportunidades e o futuro na aplicação da programação linear. Com a análise bibliométrica foram elaborados mapas temáticos gerados pelo Bibliometrix (2019), que foram utilizados para orientar as discussões da pesquisa. A representação da metodologia está na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia de pesquisa sobre PL

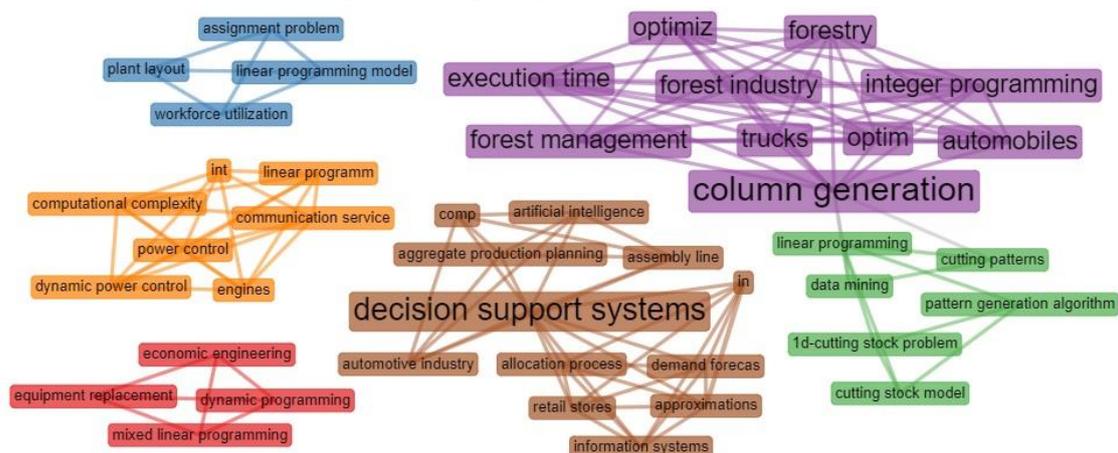


Fonte: elaborado pelo autor.

2.5.2 Aplicações da programação linear na indústria

Com base nos artigos, as aplicações da PL na indústria estão abrangidas por seis grupos, representados na Figura 7. Os estudos buscam principalmente a melhor utilização das horas de trabalho, produtividade e lucratividade.

Figura 7 - Aplicação da PL na indústria



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Os trabalhos com o uso da PL tem a aplicação na indústria automotiva, com o objetivo de aumentar a produtividade dos funcionários; e na indústria de flores tem o objetivo de determinar a quantidade de plantas-mãe que são necessárias para produzir uma quantidade de mudas adequadas para o atendimento da demanda (AZLAN *et al.*, 2019; HOOGEVEEN; TOMCZYK; VAN DER ZANDEN, 2019). Na indústria madeireira se obteve redução nos desperdícios do corte da madeira e na minimização do estoque total (OGUNRANTI; OLULEYE, 2016). No transporte utilizado na indústria de mineração, foi utilizada a PL, para melhorar a comunicação das locomotivas de minas com os pontos de acesso nas laterais dos túneis (SHI *et al.*, 2017). No biorreator de uma indústria foi aplicada a PL para identificar os padrões de fluxo ideais para a formação de aminoácidos aromáticos (WAHL *et al.*, 2004).

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). A PLI também foi aplicada na programação de caminhões para o transporte de toras de madeira, tendo como destino as serrarias, fábricas

de celulose e portos, visando minimizar o custo do transporte (REY; MUÑOZ; WEINTRAUB, 2009).

A aplicação da PLIM foi realizada em uma indústria de plásticos, para minimizar as distâncias percorridas pelos operadores, onde o tempo de caminhada dos operadores pode afetar o tempo de trabalho (GEBENNINI *et al.*, 2016). A PLIM também foi aplicada na análise de viabilidade para a substituição de veículos antigos por novos, considerando os dados reais do mercado de automóveis (ABENSUR, 2015). Outra aplicação da PLIM foi no planejamento da jornada de trabalho da mão-de-obra, com objetivo de flexibilização na carga horária em uma indústria de serviços (COROMINAS; LUSA; PASTOR, 2004). Também foram realizadas as formulações do problema da PLIM para o planejamento de produção agregado em uma indústria automotiva para flexibilizar a mão-de-obra, com mudança nos custos e na carga de trabalho dos operadores (SILLEKENS; KOBERSTEIN; SUHL, 2011). Outro estudo visou adequar o tamanho dos estoques em uma rede de lojas de varejo, buscando maximizar as vendas e seguindo as restrições de estoque dos produtos (CARO; GALLIEN, 2010).

Os modelos matemáticos da PL foram aplicados também em estudos que abrangem a programação de viagens de um caminhão, no problema de atendimento da demanda de flores, além de modelos baseados na geração de algoritmos para resolução de problemas (HOOGEVEEN; TOMCZYK; VAN DER ZANDEN, 2019; OGUNRANTI; OLULEYE, 2016; REY; MUÑOZ; WEINTRAUB, 2009). Na indústria automotiva, com o uso da PL, a estrutura de técnicas e pré-processamento dos dados foi embutida no sistema de suporte à decisão (SILLEKENS; KOBERSTEIN; SUHL, 2011). Também foi aplicada a PL para a análise na troca de veículos e na alocação de mão-de-obra, onde ambos os estudos trouxeram contribuições para a tomada de decisão (ABENSUR, 2015; AZLAN *et al.*, 2019). A Tabela 4 apresenta um panorama geral referente a formulação dos problemas da PL na indústria, onde se observa uma variedade de locais e objetivos.

Tabela 4 - Síntese das aplicações dos métodos de otimização da programação linear

Método de Otimização	Indústria	Objetivo	Autores
Programação linear	Automotiva	Melhorar a produtividade no trabalho dos operadores	(AZLAN <i>et al.</i> , 2019)
	Flores	Atender a demanda de flores	(HOOGEVEEN; TOMCZYK; VAN DER ZANDEN, 2019)
	Mineração	Melhorar a comunicação das locomotivas das minas	(SHI <i>et al.</i> , 2017)
	Madeira	Minimizar desperdício e estoque total de	(OGUNRANTI;

	Biorreator	madeira Identificar padrões para a formação de aminoácidos aromáticos	OLULEYE, 2016) (WAHL et al., 2004)
Programação linear inteira	Em geral	Atender aos níveis de disponibilidade de conexão de provedores	(KAMAL; MEMBER; AL-KOFAHI, 2011)
	Transportadora	Minimizar os custos das operações de transporte	(REY; MUÑOZ; WEINTRAUB, 2009)
Programação linear inteira mista	Plásticos	Melhorar o tempo de trabalho dos operadores	(GEBENNINI et al., 2016)
	Em geral	Analisar a viabilidade econômica na troca de veículos	(ABENSUR, 2015)
	Automotiva	Flexibilizar a mão-de-obra	(SILLEKENS; KOBERSTEIN; SUHL, 2011)
	Varejo	Melhorar a distribuição do estoque	(CARO; GALLIEN, 2010)
	Serviços	Flexibilizar a jornada de trabalho dos operadores	(COROMINAS; LUSA; PASTOR, 2004)

Fonte: elaborado pelo autor.

A PLIM foi aplicada para a melhora na alocação e distribuição da mão-de-obra na indústria, sob a perspectiva de melhorar a produtividade dos operadores e também as horas trabalhadas, podem ser citados os trabalhos nas indústrias automotiva, plásticos e de serviços (AZLAN *et al.*, 2019; COROMINAS; LUSA; PASTOR, 2004; GEBENNINI *et al.*, 2016; SILLEKENS; KOBERSTEIN; SUHL, 2011). Esses estudos contribuíram para a estimativa de férias dos operadores, a alocação da mão-de-obra para as equipes de: custos, qualidade, entrega e controle de especificação e certificação e a redução no tempo de caminhada dos operadores entre os postos de trabalho. Esses fatores além de estarem relacionados com as horas trabalhadas, também podem ser associados à produtividade.

Há estudos da PL que não abrangeram a mão-de-obra, mas avaliaram os produtos produzidos pela indústria ou serviços oferecidos, sob a perspectiva de atender a demanda, reduzir desperdícios, reduzir estoques e custos de operação (CARO; GALLIEN, 2010; HOOGEVEEN; TOMCZYK; VAN DER ZANDEN, 2019; OGUNRANTI; OLULEYE, 2016; REY; MUÑOZ; WEINTRAUB, 2009; WAHL *et al.*, 2004). Esses aspectos podem ser associados na obtenção de uma melhor produtividade nos recursos utilizados, mas também obter lucratividade, uma vez que a demanda é atendida.

Os estudos da PL também contemplam o uso dos ativos na indústria, bens móveis e imóveis, sua substituição e melhoria, para o atendimento da demanda (ABENSUR, 2015; KAMAL; MEMBER; AL-KOFAHI, 2011; SHI *et al.*, 2017). Esses aspectos estão voltados na redução dos tempos de manutenção, redução de falhas dos componentes e um maior tempo de trabalho do equipamento, repercutindo na produtividade e o tempo de trabalho.

energia sob a perspectiva de consumo global, e menos forte no uso de recursos minerais e metais, o que demonstra uma ameaça aos recursos naturais que são limitados. O desafio da PL está em prever de forma antecipada as consequências que não estão previstas (FONT VIVANCO; WANG; HERTWICH, 2018). No mercado de energia elétrica também há desafios para a PL, como o fato de uma linha específica de rede não transpor diretamente o fluxo de energia dificulta as negociações comerciais e restringe as extensões da rede. As pressões para a redução de CO₂ na Europa, requerem uma previsão de equilíbrio entre a capacidade de armazenamento e o uso de energias renováveis (HAGSPIEL *et al.*, 2014).

A indústria de manufatura também enfrenta a redução em suas margens de lucro, o aumento na consciência social e maior rigidez das políticas ambientais. Esses três aspectos são conflitantes entre si, assim as decisões a serem tomadas vão exigir maiores responsabilidades e contrapartidas. A preocupação está em obter um modelo que consiga melhorar os processos e atenda de forma satisfatória os três pilares da sustentabilidade (VALLERIO *et al.*, 2015).

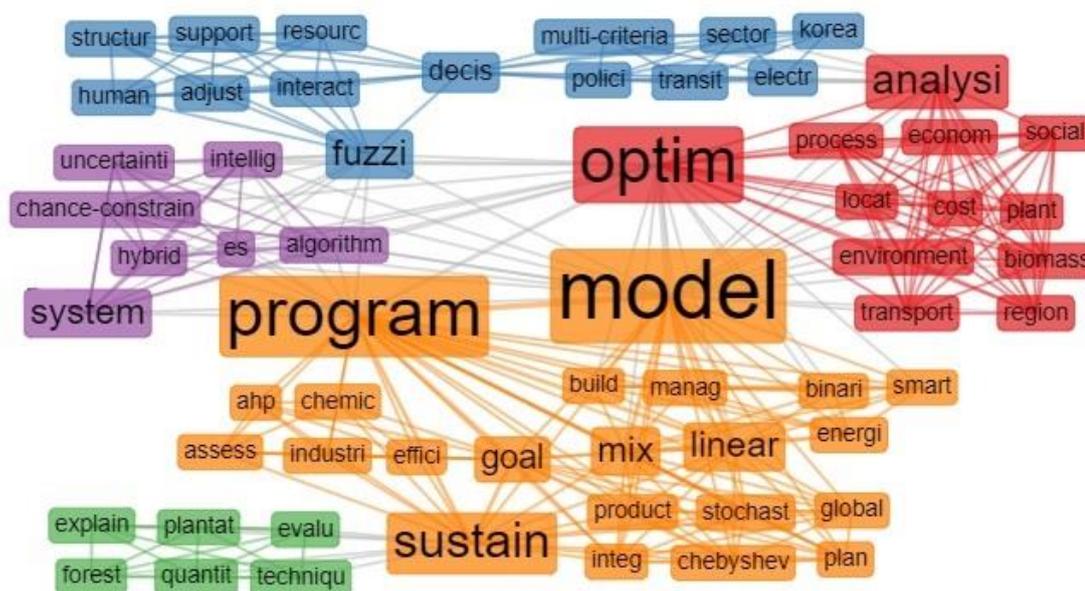
Percebe-se que na aplicação da PL alguns objetivos são não lineares, como os aspectos que abrangem a sustentabilidade (DESCAMPS *et al.*, 2014; VALLERIO *et al.*, 2015). A obtenção de uma maior lucratividade pode ter consequências negativas nos aspectos sociais e ambientais. O uso de tecnologias para o monitoramento em tempo real pode contribuir com a eliminação dos desperdícios nos alimentos, que pode agregar qualidade aos alimentos e reduzir o custo relacionado às perdas (SPRONG *et al.*, 2019). Quanto aos recursos da água, energia e terra, estão fortemente combinados na economia global. Nos Estados Unidos e na China, a água e energia estão associados ao uso da eletricidade e do carvão nas cadeias de suprimentos das indústrias, enquanto que o uso da terra tem uma relação muito forte com a agricultura e a produção de carnes. O uso mais intenso de metais e minerais tem sido liderado pela China, principalmente na indústria da construção civil (FONT VIVANCO; WANG; HERTWICH, 2018).

2.5.4 A indústria e a relação com os ODS

Com base nos artigos, a relação da indústria com os ODS, referente ao uso da PL, estão abrangidos por cinco grupos (Figura 9). Observa-se que os estudos foram realizados na indústria química, no setor de produção de uma indústria têxtil, no setor de eletricidade da Coreia, no sistema de gerenciamento de energia elétrica de um edifício inteligente, no

custo do transporte de biomassa entre indústrias, no estudo de um algoritmo híbrido com o PIB e a estrutura da indústria, nas plantações de eucaliptos e fábricas de celulose e no planejamento de recursos humanos nas 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).

Figura 9 - Relação da indústria com os ODS e uso da PL



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Na indústria química brasileira foram avaliados os indicadores de segurança ocupacional, de segurança do processo, operacionais e indicadores 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. Nos aspectos de indicadores operacionais foi trabalhada a maximização dos resultados, para todos os demais indicadores foi trabalhada a minimização do consumo e de emissões (BARBOSA; GOMES, 2015).

No setor de eletricidade da Coreia o estudo consiste no uso da tecnologia, onde as fontes de energia renovável têm alta aceitação, enquanto que a energia nuclear e fóssil tem baixa aceitação social. A instalação de fontes renováveis de energia requer maiores áreas de terra, o que é uma limitação para o país, mas reduz a emissão de poluentes e de carbono (CHOI; AHN; CHOI, 2020). Para as fábricas de celulose, o eucalipto é visto como uma

fonte renovável de energia e matéria-prima, além de ser uma importante fonte de renda sob o aspecto econômico (DIAZ-BALTEIRO *et al.*, 2016). Para o setor da construção, os edifícios inteligentes contribuem com a sustentabilidade no setor elétrico e reduzem os custos decorrentes do consumo da energia elétrica (FOROOZANDEH *et al.*, 2020).

No transporte de biomassa entre plantas industriais, foi constatado que a distância percorrida aumenta o custo do transporte e também a emissão de poluentes. O ideal seria a instalação de fábricas próximas as fontes de biomassas, entretanto é preciso considerar inadequado a instalação junto às florestas, caso venha a faltar a matéria-prima haverá disputa entre as unidades produtivas. As longas distâncias para a busca da biomassa é um aspecto negativo associado ao custo de transporte, refletindo em maior consumo de combustível e emissão de poluentes, por outro lado o estudo recomenda futuras avaliações entre custos e benefícios, devido a geração de emprego (KO *et al.*, 2019).

No planejamento de recursos humanos nas organizações, o estudo da PL considerou o tempo de treinamento dos funcionários e a realocação interna, partindo dos postos mais baixos na hierarquia. Nesse sentido, busca-se alocar nas atividades as pessoas que atendem aos requisitos de treinamento e nível de hierarquia (RAUSCH; STUMPF, 2018).

Considera-se que o principal fator de crescimento da economia são as fontes de energia, caso estas não sejam confiáveis vão afetar diretamente a produção, levando a recessão econômica. Do lado positivo o crescimento econômico estimula a demanda de energia e favorece o crescimento de recursos humanos, materiais e financeiros, impulsiona o progresso e o investimento tecnológico. Entretanto tal crescimento entra em conflito com o meio ambiente. A exploração e uso excessivo de energia degradam e destroem o meio ambiente, gerando águas residuais, resíduos sólidos, emissão de gases, prejudica a saúde humana e o próprio desenvolvimento econômico (SONG; ZHANG; CAO, 2016).

A atividade de planejamento da produção no setor têxtil depende da demanda, dos recursos de produção e variedade de produtos, onde 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 de lucros, minimizar as mudanças de empregos, atrasos e emissões de poluentes, maximizar o tempo de operação das máquinas e garantir os requisitos do cliente (WANG; NHIEU; TRAN, 2021).

A Tabela 5 demonstra a relação entre os ODS e as indústrias e atividades que foram estudadas com a aplicação da PL.

Tabela 5 - 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						X	X						X	X			
Eletricidade							X		X						X		
Celulose	X						X					X			X		
Construção							X				X						
Transporte	X						X						X		X		
Recursos Humanos			X	X	X			X									
PIB e Indústria	X		X			X	X						X	X	X		
Têxtil	X											X	X	X			

Relação positiva X
 Relação negativa X

Fonte: elaborado pelo autor.

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: plantação de eucaliptos para abastecer a indústria de celulose, transporte de biomassa para a indústria, abertura de vagas com o crescimento da economia (DIAZ-BALTEIRO *et al.*, 2016; KO *et al.*, 2019).

Em terceiro lugar está 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). A única relação negativa está no fato de que o aumento no PIB, tende a gerar uma maior atividade na indústria que acabará por emitir mais poluentes. Por outro lado, a preocupação em relação as possíveis recessões econômicas podem comprometer a renda da sociedade, afetando de forma negativa o ODS3 (saúde e bem-estar) envolvendo o aspecto social (SONG; ZHANG; CAO, 2016).

O ODS12 (consumo e produção responsáveis) tem como relação positiva a localização de unidade de plantações de eucalipto em áreas onde não haja degradação das florestas nativas e o cuidado do setor têxtil em trabalhar de forma sustentável e em conformidade com os requisitos do cliente (DIAZ-BALTEIRO *et al.*, 2016; WANG; NHIEU; TRAN, 2021).

O ODS15 (vida terrestre) possui a maior quantidade de relações negativas, devido a dependência das atividades industriais no uso da terra para a sua localização, como: a energia renovável, as plantações de eucaliptos, as unidades de transporte de biomassa e a instalação de novas fábricas decorrentes do crescimento da economia, são fatores que

requerem a ocupação de áreas de terras ocupando o habitat dos animais (CHOI; AHN; CHOI, 2020). Ainda existe a preocupação referentes aos resíduos que são lançados nas águas e a captação da água para as atividades da indústria, relacionadas ao ODS6 (água potável e saneamento) (BARBOSA; GOMES, 2015; SONG; ZHANG; CAO, 2016).

Quanto ao trabalho desenvolvido na área de recursos humanos, foram verificadas relações positivas no treinamento de funcionários e à realocação de pessoas para postos de trabalhos melhores com base na capacitação e hierarquia, promovendo assim os ODS 4 (qualidade na educação) e ODS5 (igualdade de gênero). Desta maneira, critérios claros para a promoção contribuem para um bom ambiente de trabalho, ODS3 (saúde e bem-estar) e ODS8 (trabalho descente e crescimento econômico) (DIAZ-BALTEIRO *et al.*, 2016; KO *et al.*, 2019; RAUSCH; STUMPF, 2018).

A atividade da indústria da construção para projetos de edifícios inteligentes está associada de forma positiva ao ODS10 (cidades e comunidades sustentáveis). Percebe-se que o ODS9 (indústria, inovação e infraestrutura) está mais associado ao trabalho do setor de eletricidade que busca desenvolver tecnologias para substituir a geração de energia que atualmente está no uso de usinas e recursos fósseis (CHOI; AHN; CHOI, 2020).

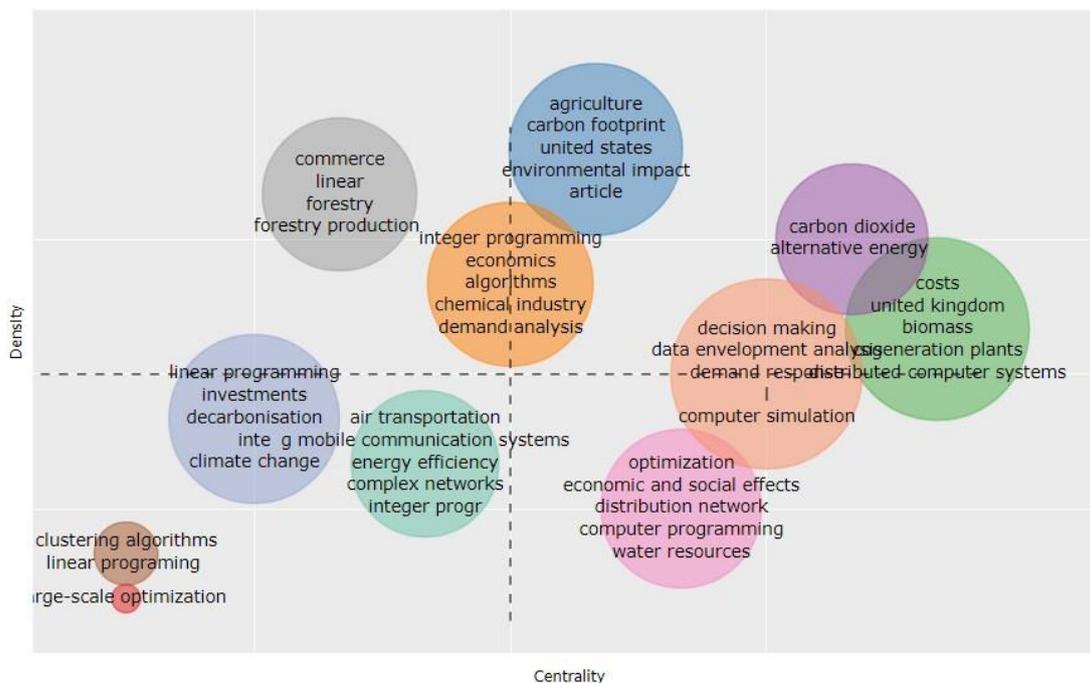
2.5.5 Perspectivas e oportunidades na aplicação da programação linear

A Figura 10, na página seguinte, representa um mapa temático, de densidade e centralidade, no qual é possível encontrar diversos temas, que podem ser agrupados em quadrantes.

Os temas localizados no quadrante inferior esquerdo são marginais e pouco desenvolvidos, têm baixa densidade e baixa centralidade. São temas emergentes ou desaparecidos (COBO *et al.*, 2011). Os temas de: *decarbonisation*, *climate change*, e *energy efficiency*, são temas que se apresentam como emergentes, pois estão publicados em estudos mais recentes além de estarem relacionados aos desafios no uso da PL e os aspectos voltados para a questão da sustentabilidade e uso dos recursos naturais por serem limitados. Nos estudos são tratados os objetivos referentes as estratégias de investimento para a redução da emissão de carbono em uma rede de supermercados (AYOUB *et al.*, 2019). Também existe a preocupação na redução da emissão de gases do efeito estufa e melhorar a eficiência energética, estudo na indústria de alimentos, com necessidade de reformulação de políticas para o setor (GOWREESUNKER; TASSOU; ATUONWU,

2018), e na substituição de caldeiras para aquecimento residencial, substituindo a fonte de energia de gás natural por eletricidade (VIJAY; HAWKES, 2017).

Figura 10 - Densidade e centralidade dos principais temas da PL



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

No assunto voltado para alterações climáticas tem-se o estudo do manejo agrícola com uso de mão-de-obra, máquinas, fertilizantes e uso de terras, considerando os períodos de chuvas e secas (NIDUMOLU *et al.*, 2016). Também o uso de biocombustíveis no maquinário agrícola tende a reduzir a emissão de poluentes associado com a preocupação com as mudanças climáticas (GLITHERO; RAMSDEN; WILSON, 2012), e 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). A eficiência energética e alocação ideal de recursos em redes móveis 5G, visando reduzir o consumo de energia, emissão de poluentes e gastos operacionais também são questões que envolvem as alterações climáticas (FENDT *et al.*, 2019; SUN *et al.*, 2018).

Os temas localizados 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). Dentre os mais importantes tem-se: *economic e social effects* e o *water resources*, são associados aos aspectos da sustentabilidade. Tem-se o estudo para a classificação da indústria referente ao consumo dos recursos naturais, onde se identificam

vínculos mais fortes relacionados no consumo da água, energia e terra (FONT VIVANCO; WANG; HERTWICH, 2018). O estudo sobre os investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e as políticas governamentais apontam que mesmo havendo altos investimentos em P&D ainda há um desalinhamento em relação as áreas dos ambientes sociais e de sustentabilidade (DI, 2021). Na produção de etanol é avaliada a viabilidade econômica e ambiental no uso de fontes de biomassa, onde se busca minimizar o custo de produção juntamente com as emissões de CO₂ e uso excessivo de água (KANTAS; COBULOGLU; BÜYÜKTAHTAKN, 2015).

Os temas localizados no quadrante superior esquerdo são temas muito especializados e de caráter periférico. 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*, onde se tem estudos no uso de biomassas como palha de cereais, além de trabalhos na indústria da celulose, o impacto que a mudança de preço da energia gera no planejamento da produção e da 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. Consistem em temas relacionados externamente a conceitos aplicáveis a outros temas que estão intimamente relacionados (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).

Dentre os estudos com o uso de energias alternativas e redução de custos na África Subsaariana, está a simulação de cenários que demonstram que o óleo de dendê é a oleaginosa que apresenta menores custos para produção do biodiesel, enquanto que o pinhão manso é a cultura que consegue contribuir com a maior geração de empregos (IANDA *et al.*, 2020). Outro estudo na Associação das Nações do Sudeste Asiático visa identificar as prioridades na demanda e fornecimento de energia elétrica, além de servir para o desenvolvimento de novas capacidades energéticas (CHANG; LI, 2013). Na indústria do papel a dependência de insumos causa reação nos preços das matérias-primas que são utilizadas para a geração de energia. Assim, a substituição por outras tecnologias

de produção tende a ser um fator importante para o atendimento da demanda (SCHOEPF; WEIBELZAHN; NOWKA, 2018).

No que se refere aos impactos ambientais o estudo na utilização de resíduos de madeira, biomassa, no sul do Estados Unidos visa a geração de empregos, atendimento da demanda, instalação de sistemas integrados de manejo florestal e a geração de bioenergia (HE *et al.*, 2016). Percebe-se ainda que os preços da energia, políticas públicas e desenvolvimentos tecnológicos precisam ser melhor trabalhados (AYOUB *et al.*, 2019). A demanda de combustíveis como a gasolina, o diesel e óleos, vão impor desafios na capacidade e qualidade da indústria dos EUA, com cuidados no contexto da política de gases do efeito estufa referente aos combustíveis utilizados no transporte (FORMAN *et al.*, 2014).

2.6 Técnicas para a tomada de decisão

O aumento na quantidade de informações tem contribuído para a complexidade na tomada de decisão. Geralmente as decisões são tomadas com base na experiência do decisor, ou ainda é possível observar divergências entre as análises dos tomadores de decisão, podendo haver opiniões tendenciosas que influenciam de forma negativa o resultado (CALACHE *et al.*, 2019). Nesse contexto, as técnicas para tomada de decisão visam apoiar os tomadores de decisão na melhor escolha, possibilitando a avaliação de vários critérios (KUMAR *et al.*, 2017).

Neste subcapítulo, duas técnicas para tomada de decisão serão descritos: a Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) e a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* - DEA). A AHP é uma técnica de tomada de decisão multi-objetivo que possibilita a análise de dados qualitativos e quantitativos (WANG *et al.*, 2021). Na DEA os critérios utilizados são categorizados como entradas e saídas, onde os fatores que precisam ser minimizados são colocados como entradas e os fatores a serem maximizados são colocados como saídas (ERTAY; RUAN; TUZKAYA, 2006; POLAT; BINGOL, 2017).

Um estudo de revisão de literatura, abrangendo os anos de 1999 até 2017, na área da engenharia de mineração e processos de mineração, identificou que a técnica AHP é a mais utilizada, tanto no modo individual como de forma híbrida (SITORUS; CILLIERS; BRITO-PARADA, 2019). Podem ser citados mais estudos com o uso da AHP na indústria

automobilística para o desempenho da manufatura e fluxo de produção (PÉREZ-DOMÍNGUEZ *et al.*, 2019). Na melhor utilização de equipamentos, para eliminar gargalos e treinamento dos operadores (KARTHEE; VISHAL SANKAR; RAJ, 2018).

A AHP está entre uma das técnicas mais poderosas para a tomada de decisão, que foi proposta originalmente por Saaty em 1980, aplicado em uma variedade de usos, mede intangíveis com a assistência de julgamentos de especialistas por meio de comparações entre pares (DESHMUKH; HIREMATH, 2018). Uma vez selecionados os critérios, ocorre a comparação por pares. Os pesos dos critérios são calculados dentro da hierarquia estabelecida. Primeiro se atribui um valor qualitativo ao critério e em seguida atribui-se o valor numérico. Assim a pontuação é atribuída de forma que pareça razoável, e em seguida são realizadas comparações recíprocas aos pares de uma maneira cuidadosamente projetada (SAATY, 2005).

A DEA tem o objetivo de fazer um *benchmarking* do desempenho das unidades de marcação de decisão (DMUs). São avaliadas unidades que se utilizam das mesmas entradas e saídas, sendo comparadas entre si. A eficiência calculada é o valor máximo, que faz com que a esta simplificação seja eficaz para evitar suposições subjetivas. O julgamento ocorre de forma objetiva. As DMUs que ficam fora da fronteira eficiente podem ser consideradas de baixo desempenho, e podem ser analisadas posteriormente para avaliar o que pode ser feito para melhorar sua eficiência (BENÍTEZ-PEÑA; BOGETOFT; ROMERO MORALES, 2020).

Como exemplos da combinação das técnicas AHP e DEA, cita-se um estudo de *layout*, para uma indústria de usinagem de peças de precisão. Os dados de desempenho qualitativo foram obtidos aplicando a AHP. A DEA foi aplicada para identificar os escores de eficiência considerando os dados de desempenho quantitativo e qualitativo, possibilitando a determinação da melhor alternativa global (ARUNYANART; PRUEKTHAISONG, 2018). A combinação das técnicas também foi utilizada para avaliar o projeto de *layout* de instalação, onde a AHP foi aplicada para avaliar os dados qualitativos de qualidade e flexibilidade (ERTAY; RUAN; TUZKAYA, 2006). Outro estudo combinou as técnicas AHP e DEA para avaliação do desempenho das empresas do setor de energia fotovoltaica. A AHP foi aplicada para coletar a opinião dos especialistas e a DEA para medir quais são as empresas mais eficientes (LEE *et al.*, 2012). Ainda foi realizada a avaliação no desempenho de segurança no trânsito de um conjunto de países europeus (ou DMUs) combinando as técnicas AHP e DEA (PAKKAR, 2016). E um estudo

que fez a classificação de unidades organizacionais, onde cada unidade possui várias entradas e saídas (SINUANY-STERN; MEHREZ; YOSSI, 2000).

2.6.1 A técnica AHP

A AHP pode ser aplicada em uma variedade de usos, mede intangíveis com a assistência de julgamentos de especialistas por meio de comparações entre pares (DESHMUKH; HIREMATH, 2018). A técnica AHP “aceita variáveis quantitativas e qualitativas, além de permitir que as avaliações sejam feitas com base no conhecimento e impressões subjetivas que o tomador de decisão tem sobre o assunto em estudo” (MORAES; SANTALIESTRA, 2008, p. 2).

O problema é estruturado em um número “A” de alternativas e combinado com um número “C” de critérios de decisão. “Cada alternativa deve ser avaliada do ponto de vista do critério de decisão. Cada critério de decisão tem um peso próprio que deve ser calculado e levado em consideração no cálculo final” (MORAES; SANTALIESTRA, 2008, p. 3). A Tabela 6, demonstra a matriz de decisão que é utilizada na técnica AHP.

Tabela 6 - Modelo genérico exibindo critérios, pesos e alternativas

Alternativas	Critérios				
	C ₁	C ₂	C ₃	...	C _x
	P ₁	P ₂	P ₃	...	P _x
A ₁	a ₁₁	a ₂₁	a ₃₁	...	a _{x1}
A ₂	a ₁₂	a ₂₂	a ₃₂	...	a _{x2}
A ₃	a ₁₃	a ₂₃	a ₃₃	...	a _{x3}
...
A _y	A _{1y}	A _{2y}	A _{3y}		A _{xy}

Fonte: adaptado (MORAES; SANTALIESTRA, 2008, p. 3).

A metodologia passo a passo da AHP, tem as etapas listadas abaixo (SAATY, 2005; MORAES; SANTALIESTRA, 2008; DESHMUKH; HIREMATH, 2018):

Etapla 1: selecionar os critérios e relacionar com as alternativas;

Etapla 2: elaborar com o auxílio dos tomadores de decisão ou especialistas a comparação entre os pares de critérios. A comparação segue a escala de 5 pontos da Likert, modificada posteriormente para a escala de Saaty, que sugeriu o uso de uma escala padrão de valores, que variam de 1 a 9, como forma de avaliar numericamente alternativas e critérios em um

processo de decisão. Para diminuir as dúvidas no momento do julgamento, Saaty definiu um atributo qualitativo com uma explicação textual. A escala está descrita na Figura 11.

Figura 11 - A “escala de importância fundamental”, proposta por Saaty

Intensidade da importância	Definição
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Importância forte ou essencial
7	Importância muito forte ou demonstrada
9	Importância extrema (absoluta)
2, 4, 6, 8	Valores intermediários
Uso recíproco para comparações inversas	

Fonte: adaptado de Saaty (2005).

Etapa 3: calcular os pesos das alternativas e dos critérios dentro da hierarquia estabelecida. Primeiro se atribui um valor qualitativo ao critério e em seguida atribui-se o valor numérico. Assim a pontuação é atribuída de forma que pareça razoável, e em seguida são realizadas comparações recíprocas aos pares de uma maneira cuidadosamente projetada (SAATY, 2005);

Etapa 4: verificar a confiabilidade dos resultados por meio do Índice de consistência (CI) e e a Razão de coerência (RC);

Etapa 5: se o valor do $RC < 0,10$ representa que há coerência nos pesos alocados aos critérios. Caso contrário a comparação entre os pares de critérios deve ser revisada, até que a condição de consistência seja atingida. O estudo na área do gerenciamento de peças de reposição obteve um valor de $RC < 0,20$ utilizando a técnica AHP, sob a perspectiva de que nem sempre é possível melhorar esse valor, pois a inconsistência não é um erro, mas uma variação nos dados (SCALA; NEEDY; RAJGOPAL, 2010);

Etapa 6: calcular os pesos finais, multiplicando os pesos dos critérios pelos valores normalizados. Os tomadores de decisão vão se concentrar na alternativa que receber o maior peso final.

2.6.1.1 Metodologia de revisão bibliométrica e sistemática sobre a técnica AHP

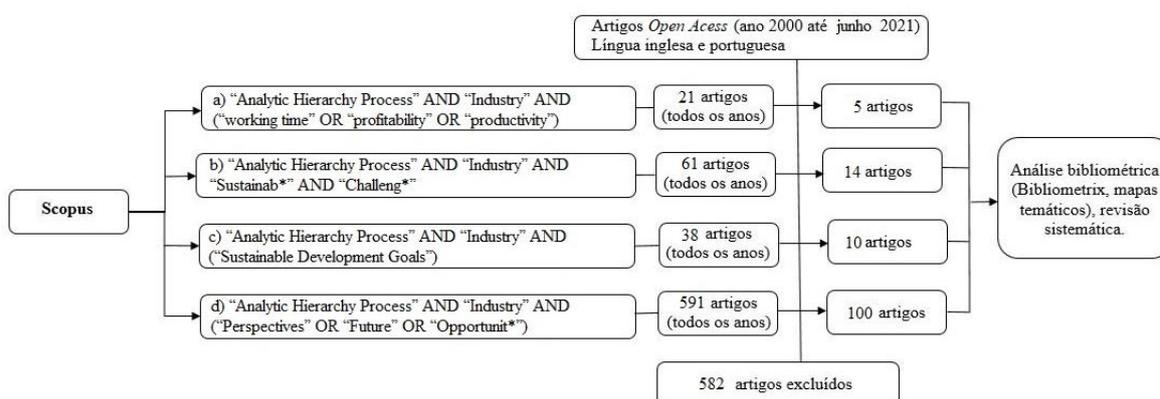
O estudo consiste em uma revisão bibliométrica, elaborada para apresentar o cenário do estado atual do conhecimento sobre a aplicação da técnica AHP na indústria, baseado em uma revisão do “estado da arte”. A metodologia teve como referência o estudo

realizado por (NAZARI *et al.*, 2020). Foram utilizados os métodos de revisão bibliométrica e sistemática, sendo possível identificar sua aplicação na indústria, os desafios na aplicação e tendências na área. O trabalho buscou responder as seguintes questões de pesquisa:

- a) Quais são as aplicações com o uso da AHP na indústria que abrangem: o tempo de trabalho, lucratividade e produtividade?
- b) Quais são os desafios observados na aplicação da AHP na indústria?
- c) Quais os aspectos positivos e negativos de trabalhar os objetivos do desenvolvimento sustentável na indústria com a aplicação da AHP?
- d) Quais são as perspectivas, as oportunidades e o futuro na aplicação da AHP na indústria?

A representação da metodologia está na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia de pesquisa sobre o AHP

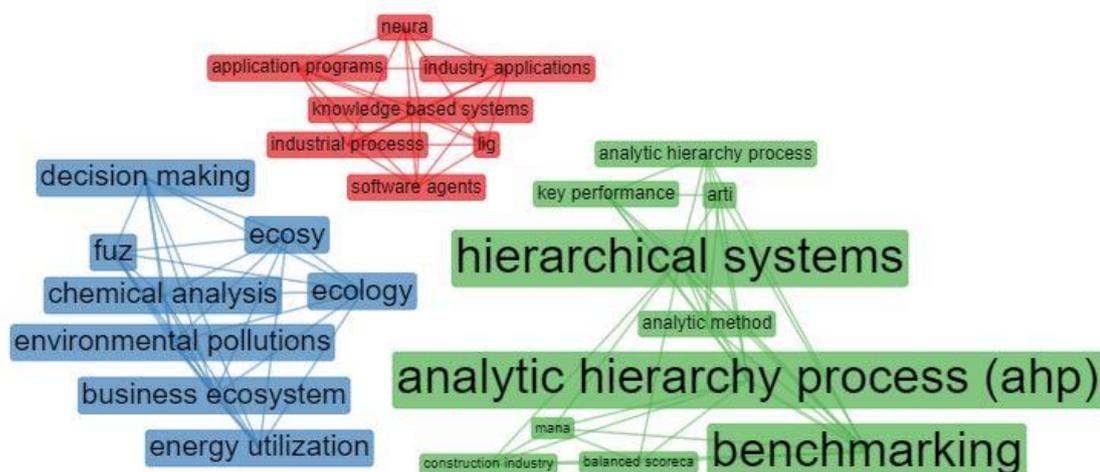


Fonte: elaborado pelo autor.

2.6.1.2 Aplicações da técnica AHP na indústria

Com base nos artigos, as aplicações da AHP na indústria estão abrangidas por três grupos, representados na Figura 13. Os estudos buscam principalmente a melhor utilização das horas de trabalho, produtividade e lucratividade.

Figura 13 - Aplicações da AHP na indústria



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Com o uso da AHP voltado para a produtividade, na gestão eficaz de operações dentro da indústria, foi observado que há três fatores que mais contribuem com o aumento da produtividade: atitude positiva e envolvimento da gestão, funcionários proativos e boas condições de trabalho (KUMAR; DUHAN; HALEEM, 2016). Na indústria da construção é possível usar a AHP para o alinhamento de dois modelos de gestão, o *Balanced Scorecard* (BSC) e o *Excellence Model* (EFQM), foi possível identificar que se pode fazer uso das melhores práticas, para alinhar a estratégia do negócio com o ambiente externo e selecionar indicadores-chave de desempenho (KPIs) que estejam alinhados à estratégia da empresa (VUKOMANOVIC; RADUJKOVIC, 2013).

A AHP também foi aplicada na indústria da telecomunicação, para o gerenciamento de peças de reposição de uma operadora. Foram reduzidas as despesas operacionais e a redução de tempo que envolve o gerenciamento de peças de reposição. Tal fator contribuiu para tirar dos técnicos algumas tarefas que eram monótonas (MOURONTE-LÓPEZ, 2018). A AHP também foi utilizada na classificação de indicadores-chave, para medir o desempenho operacional com auxílio do sistema de gestão de segurança e saúde ocupacional, melhorando a alocação de recursos para o atendimento ao plano de ação, contribuindo para identificar as melhores práticas (PODGÓRSKI, 2015).

2.6.1.3 Desafios na aplicação da AHP

Com base nos artigos, os desafios da AHP na indústria estão abrangidos por quatro grupos (Figura 14). Observa-se que em grande parte dos estudos existe a questão da sustentabilidade na indústria (PACANA; SIWIEC; BEDNÁROVÁ, 2020).

Figura 14 - Desafios na aplicação da AHP



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Além dos aspectos econômicos e de produção, há desafios relacionados no uso da água, energias renováveis, gestão de valor voltada para a proteção ambiental (KUDURS *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020b; ZHANG *et al.*, 2014). As empresas têm enfrentado desafios quando buscam aliar o melhor desempenho econômico a uma maior responsabilidade socioambiental (SALVADO *et al.*, 2015).

São diversos os estudos com aplicação da AHP na indústria, que buscam atender aos aspectos que abrangem a sustentabilidade. Como a avaliação de um modelo de manufatura sustentável, para uma indústria de cimento, alocando os indicadores-chave de desempenho (KPIs) com base nos pilares do *triple bottom line* (TBL) (aspectos econômicos, ambientais e sociais), pois a manufatura neste ramo de indústria consome grande quantidade de matérias-primas e energia, com alta emissão de poluentes (AMRINA; VILSI, 2015). Também foram utilizados os critérios do TBL para a aquisição de equipamentos de terraplenagem na indústria da construção, onde o critério mais importante é o custo do ciclo de vida, após vem o critério de desempenho e capacidade do equipamento (WARIS *et al.*, 2019). O uso do TBL também ocorreu no processo de seleção

de fornecedores para a indústria de confecção (WANG; YANG; CHENG, 2019), e na seleção de fornecedores verdes em uma indústria de alta tecnologia, sob a perspectiva de que a empresa consiga desenvolver capacidades sustentáveis contínuas e atuar em um ambiente de incertezas (WANG CHEN *et al.*, 2016). A sustentabilidade também foi utilizada, com base no TBL, para o cálculo do índice de manufatura sustentável usando a AHP, visando a contribuição de uma visão holística em um Instituto de Padrões e Tecnologia. Foi constatado que o Instituto conseguiu obter apenas metade da pontuação para ser enquadrado com uma manufatura sustentável (OCAMPO, 2015).

Também se buscou elencar os principais critérios para a sustentabilidade e habitabilidade de uma cidade. Foi aplicada a AHP, que apontou que o principal critério é a infraestrutura de construção, importância essa atribuída à característica dos edifícios (REIS *et al.*, 2019).

Na indústria fotovoltaica, a aplicação da AHP buscou promover a identificação de melhorias em nós de acoplamento para veículos elétricos e oferecer um referencial teórico também para o desenvolvimento sustentável, sendo um dos critérios a capacidade sustentável (LIU *et al.*, 2020b). Outro estudo com uso da AHP, aponta que na Letônia o uso de energia fotovoltaica é algo prioritário. Entretanto é necessário desenvolver medidas políticas adequadas para superar as barreiras, como: investimentos altos, longos períodos de retorno do investimento e restrições de infraestrutura (KUDURS *et al.*, 2020).

Na indústria automotiva, o uso da AHP apontou o melhor modelo de veículo, considerando: os veículos com motores de combustão interna, elétricos, elétricos híbridos e células a combustível, para ajudar a reduzir a quantidade de emissão de gases poluentes, bem como contribuir para a tomada de decisões de políticas públicas, demonstrando que os veículos elétricos podem ser a melhor alternativa para um futuro próximo (DIEGUEZ *et al.*, 2020). Também é proposto com uso da AHP o cálculo de um índice de sustentabilidade, para informar qual o seu nível na área econômica, social e ambiental, mostrando seu desempenho tanto em uma categoria individual quanto na cadeia de suprimentos. O estudo considera que há limitação de dados voltados à dimensão econômica (SALVADO *et al.*, 2015).

A AHP também foi combinada com a matriz SWOT (*Strength, Weakness, Opportunity and Threat*), para apontar os pontos forte da indústria cultural na China. Foi constatado que as paisagens e história são a principal força, sendo uma forte oportunidade a alta demanda do mercado chinês (FAN; XUE, 2018). Outro aspecto é a reformulação do

ensino superior para a educação sustentável combinada com a visão da Indústria 4.0, tem-se oportunidades e desafios. Fez-se o uso da AHP com a matriz SWOT, e como requisitos principais obteve-se o planejamento financeiro, pessoal qualificado, parcerias com as indústrias, infraestrutura avançada e currículos revisados (MIAN *et al.*, 2020).

2.6.1.4 A indústria e a relação com os ODS no uso da AHP

Com base nos artigos, a relação da indústria com os ODS, referente ao uso da AHP, estão abrangidos por cinco grupos, sendo que um deles não possui conexão com os demais, mas abrange a gestão industrial, análise dos postos e tempo de trabalho, voltado a produção enxuta e uso da programação linear, aspectos estes que estão mais voltados ao dia a dia das indústrias: química, automotiva e provedores logísticos (ver Figura 15). Observa-se que há quatro grandes grupos de estudos que têm relação com o desenvolvimento sustentável, onde se busca: melhorar gerenciamento dos recursos humanos, reduzir a emissão de poluentes, melhorar a infraestrutura urbana e a indústria local, desenvolver o turismo e a agricultura sustentável (DADASHPOUR; BOZORGI-AMIRI, 2020; DIEGUEZ *et al.*, 2020; GULIYEVA; LIS, 2020; PAN; CHIU, 2017; REIS *et al.*, 2019; TAO, 2019; WANG *et al.*, 2016b).

Figura 15 - Tomada de decisão na indústria e a relação com o desenvolvimento sustentável



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Um estudo com uso da AHP buscou classificar critérios para escolha dos melhores provedores logísticos terceirizados, em uma indústria de laticínios, para redução de custos de logística e estoques. Além de avaliar os três pilares da sustentabilidade, também foram avaliados os critérios técnico e reputação. No critério ambiental foi considerada poluição e o consumo de recursos, e no critério social a qualificação e treinamento dos funcionários (DADASHPOUR; BOZORGI-AMIRI, 2020). Tais critérios podem ser relacionados com o ODS 4, ODS 8, ODS 12 e ODS 13.

Referente ao desenvolvimento do turismo costeiro sustentável em Taiwan, foram estruturados os principais indicadores de desempenho que afetam a exploração dos recursos e que podem servir de referência para o setor público utilizar no planejamento e desenvolvimento do turismo. Foi constatado que: meio ambiente e ecologia, gestão e política, são as duas dimensões que mais afetam o desenvolvimento sustentável neste setor (WANG *et al.*, 2016b). Estes critérios podem ser relacionados ao ODS 1, ODS 8, ODS 12, ODS 14 e ODS 15.

Referente à agricultura sustentável, um estudo identificou as prioridades para uma política agroalimentar no Azerbaijão, para garantir um desenvolvimento mais dinâmico e sustentável da indústria alimentar e da economia nacional. Dentre os critérios mais importante elencados pela AHP, tem-se: a aquisição e o preço da terra, a qualificação da mão-de-obra rural, as condições climáticas e o uso de padrões de certificação e rótulos que demonstrem aos consumidores as práticas sociais, ambientais e de qualidade na produção (GULIYEVA; LIS, 2020). Os critérios podem ser relacionados do ODS 1, ODS 2, ODS 3, ODS 4, ODS 8, ODS 12, ODS 13 e ODS 17.

Também foi aplicada a AHP para estabelecer uma ordem de prioridade nas políticas que facilitam o desenvolvimento sustentável industrial. A cidade de Taoyuan foi objeto do estudo. Os resultados indicaram que: infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento inovadores e políticas governamentais, são imprescindíveis para o desenvolvimento industrial local (PAN; CHIU, 2017). Os critérios podem ser relacionados ao ODS 8, ODS 9 e ODS 17.

Na indústria automotiva foi utilizada a AHP para avaliar a melhor tecnologia de motorização veicular, visando reduzir a emissão de poluentes (DIEGUEZ *et al.*, 2020). Esse critério está relacionado com o ODS 7 e ODS 13. Outro estudo propôs uma metodologia para avaliação e melhoria contínua da eficiência e sustentabilidade em uma Indústria Química brasileira, onde os critérios com as melhores pontuações foram: garantir

a confiabilidade dos equipamentos, melhorar o uso da capacidade e observar os custos de produção. Um destes indicadores pode comprometer em partes a sustentabilidade, uma vez que haverá maior consumo total de energia (BARBOSA; GOMES, 2015). Estes critérios podem ser associados ao ODS1, ODS 7, ODS 8, ODS 9 e ODS 12.

O estudo voltado para o desenvolvimento da infraestrutura urbana, utilizando a AHP, demonstrou que a melhora no sistema de infraestrutura apoia a melhora no desenvolvimento urbano econômico, social e ambiental, na cidade de Pequim. Precisa haver melhora no saneamento urbano e no tratamento de resíduos domésticos. O aumento no PIB e o grau de desenvolvimento social tem um impacto positivo e direto na coordenação de atividades desse setor (TAO, 2019). Também se tem o estudo voltado para avaliar a sustentabilidade e habitabilidade de uma cidade, onde o critério de melhor desempenho foi a infraestrutura da construção, relacionado à importância das características nos edifícios (REIS *et al.*, 2019). Outro estudo visou apoiar o desenvolvimento da avaliação de sustentabilidade para a reforma de 100 edifícios que pertencem ao governo, na Malásia. Tal atividade visou reduzir o consumo de energia e a emissão de CO₂. Entre os temas (alternativas) que foram comparados no uso da AHP, obteve-se como resultado nas quatro primeiras colocações: a energia, qualidade no ambiente interno, água e desperdícios (KAMARUZZAMAN *et al.*, 2018). Esses temas estão relacionados com o ODS 3, ODS 6, ODS 7, ODS 8, ODS 9 e ODS 11.

A Tabela 7 apresenta uma síntese do foco dos estudos referente aos ramos de atividade da Indústria e com quais ODS eles mais se relacionam.

Tabela 7 - Síntese do foco dos estudos nos ODS

Indústria	Objetivos do desenvolvimento sustentável																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Provedores logísticos				X				X				X	X				
Turismo sustentável	X							X				X		X	X		
Agricultura sustentável	X	X	X	X				X				X	X				X
Desenvolvimento sustentável industrial								X	X								X
Indústria automotiva							X						X				
Indústria química	X						X	X	X			X					
Indústria da construção			X			X	X	X	X		X						
Total	3	1	2	2	0	1	3	6	3	0	1	4	3	1	1	0	2

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

2.6.1.5 Perspectivas e oportunidades com o uso da AHP

Sobre as perspectivas e oportunidades da aplicação da técnica AHP na indústria são identificados vários fatores críticos, entre eles os fatores de sucesso para a cadeia de abastecimento do setor farmacêutico, como: tecnológico, organizacional e ambiental (BRITO; MATTOS, 2019). Na indústria indiana, os fatores como: atitude positiva e envolvimento da gestão, funcionários proativos, boas condições de trabalho, disponibilidade de água, energia e insumos foram considerados como mais importantes para o aumento na produtividade (KUMAR; DUHAN; HALEEM, 2016). Na indústria da construção, os canteiros de obra representam importância sob o aspecto de consumo de energia e desempenho ecológico (WANG *et al.*, 2019b). Também o uso de materiais na construção, com baixo teor de carbono, que poderiam contribuir para reduzir as emissões de carbono e economizar energia (SHIM; KIM; CHOI, 2019).

Há oportunidades do uso da AHP em melhorias na produção e investimentos em pesquisa e desenvolvimento referente ao uso de fertilizantes químicos e pesticidas, na Província de Gansu, mesmo sendo o seu uso inferior à média nacional, foram identificadas elevadas emissões de gases residuais (YING, 2021).

Também são verificadas oportunidades na aplicação da AHP para melhorar o gerenciamento de dados na indústria farmacêutica, (BRITO; MATTOS, 2019), na avaliação do controle e de custos da tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) e em projetos de transmissão e transformação de energia, que pode orientar efetivamente as empresas de rede elétrica a promover e aplicar a tecnologia (DUO; ZHENGPING; CHENLEI, 2021). Nos Estados Unidos foi realizado um estudo referente ao uso do *Cloud enterprise resource planning* (C-ERP), sendo considerado como uma tecnologia mais nova da indústria 4.0, onde foram elencadas as vantagens como: compatibilidade, complexidade, prontidão da tecnologia, competência, tamanho da organização, suporte da alta administração, pressão competitiva, suporte do fornecedor e conformidade regulatória (MARINHO *et al.*, 2021). A técnica AHP também apresenta oportunidades no gerenciamento do risco de segurança do sistema de gestão hospitalar baseado na *web*, visando à proteção da integridade das informações em alinhamento com a Lei de Portabilidade e Responsabilidade de Seguros de Saúde, no hospital de Varanasi, na Índia, considerando como critérios importantes a autenticação e a avaliação de risco nesse sistema (A. ALZHRANI, 2021).

Outra perspectiva no uso da AHP está no setor de energia fotovoltaica na China, para avaliar diferentes características da rede elétrica regional, foi recomendado a avaliação de mais critérios além da confiabilidade, consumo e economia no investimento (WANG *et al.*, 2021). A técnica AHP também pode ser aplicado para determinar a correlação entre a eficiência do canteiro de obras e o consumo de energia (WANG *et al.*, 2019b), e na gestão do patrimônio arquitetônico, utilizando o conceito de cidade inteligente, com o enquadramento de estratégias e metas legislativas, para promover a integridade, conservação e estabilidade, incentivando parcerias público-privadas (MILOŠEVIĆ *et al.*, 2021).

A técnica AHP apresenta oportunidades na indústria de componentes automotivos, onde um estudo realizado no Egito, identificou que os critérios de sustentabilidade social, ambiental e de risco e segurança tem maior influência na escolha de fornecedores terceirizados (ABDEL-BASSET *et al.*, 2021). Também foi conduzido o estudo da AHP na área da pesquisa operacional, onde se demonstrou que a otimização ainda continua a ser uma das contribuições metodológicas mais influentes nessa área. Ainda há oportunidades para trabalhos com o uso da AHP voltados à economia circular, emissões de carbono, desperdício de alimentos, manufatura verde, ecoeficiência, na área da manufatura aditiva, computação em nuvem, cidades inteligentes, microrredes e *digital twin* (ROMERO-SILVA; DE LEEUW, 2021).

2.6.2 A técnica DEA

A técnica da Análise Envoltória de Dados – DEA (*Data Envelopment Analysis*) consiste em uma abordagem não paramétrica que utiliza a técnica de programação linear para medir a eficiência das unidades de tomada de decisão (DMU) (LEE; LEE; KIM, 2009). Uma DMU pode ser considerada como um produto, projeto, departamento ou até uma empresa (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018).

Com o uso da técnica DEA podem ser analisadas múltiplas entradas e saídas ao mesmo tempo. Existem dois tipos de DEA, orientado para entrada (*input*) e orientado para saída (*output*). O modelo orientado para entrada busca minimizar os requisitos de entrada para pelo menos um determinado nível de saída. O modelo orientado para saída maximiza os valores de saída para uma determinada entrada (PIRAN; LACERDA; CAMARGO, 2018).

A DEA pode trabalhar com dois modelos de escala. O modelo de Retorno Constante de Escala - CRS (*Constant Return of Scale*), foi inicialmente criado por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978, para a medição de eficiência onde todas as DMUs operam em seu nível de escala ideal. Outro modelo foi criado por Banker, Charnes e Cooper em 1984, denominada de Retorno Variável de Escala – VRS (*variable returns to scale*), onde a eficiência geral pode ser subdividida em eficiências técnicas de escala. (SINGH *et al.*, 2014).

Na DEA a DMU pode ser medida pela sua eficiência técnica, que é a capacidade de produzir uma determinada saída com um mínimo de entradas (orientada para *inputs*), ou utilizar as entradas para produzir um nível máximo de saídas (orientada para *outputs*). A DMU alcança eficiência de escala quando opera em uma escala ideal. Nesse sentido são construídas fronteiras, onde todas as DMUs eficientes se encontram. As DMUs ineficientes se encontram abaixo da linha da fronteira. O índice de eficiência varia de 0 a 1 (totalmente ineficiente até eficiente) (COELLI, 1995).

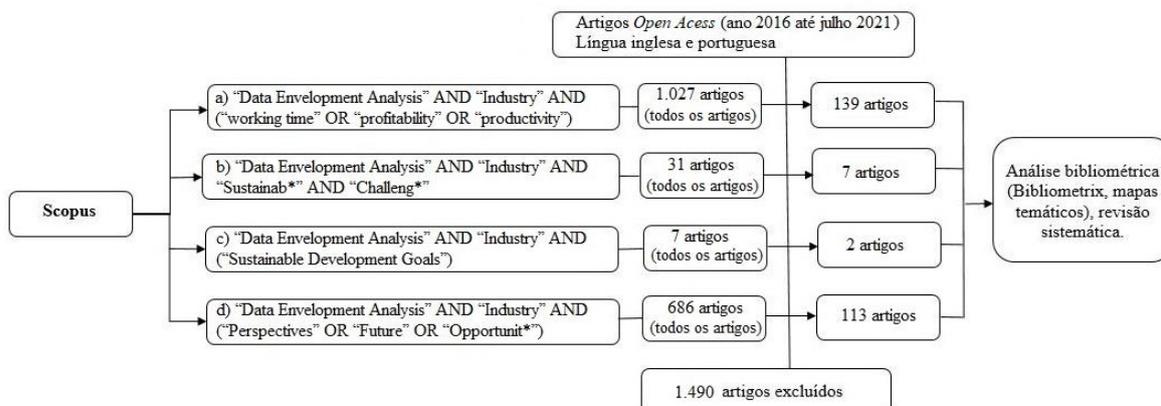
2.6.2.1 Metodologia revisão bibliométrica e sistemática sobre o método DEA

A metodologia utilizada para o estudo e aplicação da Análise Envoltória de Dados teve como referência o estudo realizado por (NAZARI *et al.*, 2020). Foram utilizados os métodos de revisão bibliométrica e sistemática, visando o “estado da arte”, sendo possível identificar um histórico de pesquisas relacionadas ao tema, sua aplicação na indústria e identificar tendências na área, onde se buscou responder as questões de pesquisa:

- a) Quais são as aplicações com o uso da Análise Envoltória de Dados na indústria que abrangem: o tempo de trabalho, lucratividade e produtividade?
- b) Quais são os desafios observados na aplicação da Análise Envoltória de Dados na indústria?
- c) Quais os aspectos positivos e negativos de trabalhar os objetivos do desenvolvimento sustentável na indústria com a aplicação da Análise Envoltória de Dados?
- d) Quais são as perspectivas, as oportunidades e o futuro na aplicação da Análise Envoltória de Dados na indústria?

A representação da metodologia está na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma da Metodologia de pesquisa sobre DEA

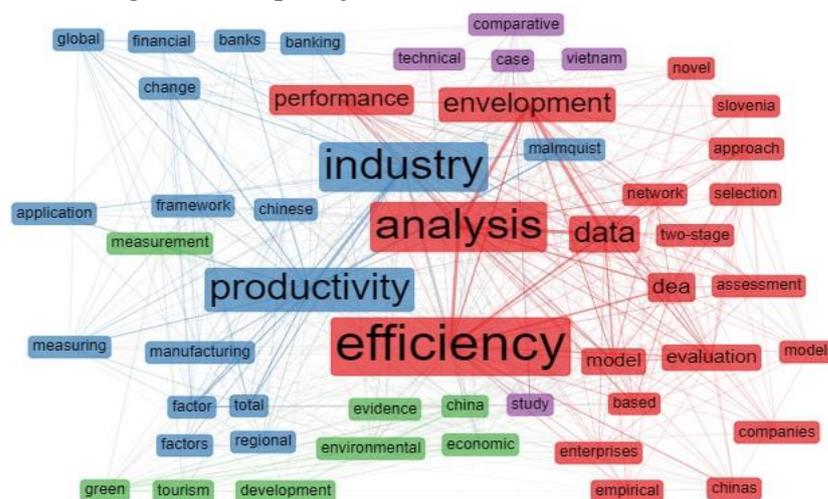


Fonte: elaborado pelo autor.

2.6.2.2 Aplicações da técnica DEA na indústria

Com base nos artigos, as aplicações da DEA na indústria estão abrangidas por quatro grupos, representados na Figura 17. Os estudos buscam principalmente melhorar a eficiência e a produtividade de instituições bancárias, melhorar a eficiência da indústria, no comércio e turismo (BAO; ZENG; WANG, 2020; HIGUERREY *et al.*, 2020; PACHAR; GUPTA; JHA, 2020; XU *et al.*, 2020).

Figura 17 - Aplicação da DEA na indústria



Fonte: elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2019).

Com o uso da DEA foi avaliada a eficiência da gestão no sistema bancário na Rússia, onde foram utilizados os valores de entrada (para minimizar): número de filiais,

despesas com juros e despesas totais. Os valores de saída (para maximizar): lucro líquido e ativos totais. Considera-se que o tamanho do banco não é suficiente para caracterizar com eficácia os líderes do setor (KAZEMI *et al.*, 2021). A alocação de recursos humanos na área bancária pode melhorar a eficiência e gerar mais lucratividade (BAO; ZENG; WANG, 2020). Também foi aplicada a DEA no estudo da eficiência e produtividade das seguradoras suíças, nos setores: de vida, propriedade, acidentes e resseguro, onde se percebeu que as empresas com negócios internacionais apresentam níveis de eficiência superior comparadas com as demais (BIENER; ELING; WIRFS, 2016).

A DEA também foi aplicada para avaliar a eficiência na emissão de CO₂ na indústria de mineração da China (ZHANG; FEI, 2021), em propor políticas para melhorar a eficiência econômica de baixo carbono na indústria siderúrgica da China (XU *et al.*, 2020), na análise da eficiência energética na União Européia (UE), onde se tem aumento da produtividade do trabalho e diminuição da intensidade energética, medidas associadas à liberação do mercado de energia e uso de tecnologia na indústria (SIMEONOVSKI; KAFTANDZIEVA; BROCK, 2021). Também, com o uso da DEA foi avaliada a eficiência de desenvolvimento nos setores público e privado nos países da UE. Foi observado um aumento na produtividade nos países da Espanha, Eslovénia e Portugal (no setor público) e Irlanda e Roménia (no setor privado), decorrente de investimentos em pesquisa e desenvolvimento (HALASKOVA; GAVUROVA; KOCISOVA, 2020).

Nos Estados Unidos a avaliação das 10 principais empresas de comércio eletrônico com o uso da DEA, apontou que a Covid-19 foi um catalisador para esse ramo de mercado, na execução de atividades mais sustentáveis e obtenção em avanços e inovação tecnológica (WANG *et al.*, 2020b). O estudo com uso da DEA, nas redes de varejo que atuam no comércio eletrônico na Índia, constatou que a eficiência das lojas está associada a um planejamento detalhado. A eficiência nas operações faz com que se atinja a sustentabilidade econômica e lucratividade (PACHAR; GUPTA; JHA, 2020).

Na indústria hoteleira foi realizado um estudo com aplicação da DEA para medir a eficiência e a produtividade dessa atividade no Equador, demonstrando que a eficiência dos hotéis no país não melhorou, sendo interessante haver políticas públicas que promovam tal desenvolvimento. Destaca-se ainda a importância de incluir em estudos futuros a qualidade dos serviços nesse ramo de atividade (HIGUERAY *et al.*, 2020).

2.6.2.3 Desafios na aplicação do método DEA

Os desafios da DEA na indústria estão abrangidos por estudos que tratam sobre: o desenvolvimento sustentável, uso de energia renovável e potencial na produção de alimentos. Observa-se que em grande parte dos estudos existe a questão da sustentabilidade na indústria nos seguintes assuntos: ao uso da biomassa florestal para a geração de energia na Suécia, analisar o potencial da China na produção de hidrogênio a partir da energia eólica e solar, avaliar a sustentabilidade no uso de diferentes tecnologias para geração de eletricidade no Reino Unido, reduzir os impactos ambientais no consumo de alimentos, aumentar a eficiência na produção das lavouras de cacau em Gana, avaliar a tecnologia da informação para a gestão de hotéis, avaliar o progresso das universidades nigerianas na transferência de inovação tecnológica (DANSO-ABBEAM; BAIYEGUNHI, 2020; FADEYI *et al.*, 2019; GALÁN-MARTÍN *et al.*, 2016; HUANG; LIU, 2020; LUCAS *et al.*, 2021; LUNDMARK *et al.*, 2021; YIN; YANG; YANG, 2020).

O desafio no uso da DEA engloba a energia renovável, onde foi verificado que a produção de hidrogênio verde no noroeste e norte da China é maior que em outras regiões, com maior eficiência para a produção a partir da energia eólica em comparação à energia solar (HUANG; LIU, 2020), também no uso das tecnologias de geração de energia: a gás, nuclear e a eólica, no Reino Unido, percebe-se que todas são eficientes nas três dimensões da sustentabilidade. Porém a energia a gás, possui maior eficiência global de sustentabilidade, principalmente no desempenho do aspecto social (GALÁN-MARTÍN *et al.*, 2016). A DEA também foi aplicada para indicar que o maior uso de biomassa florestal, para a geração de energia, tende a restringir o aumento nos preços da energia e tornar os investimentos em bioeconomia mais atrativos. O uso de um manejo florestal mais eficiente na Suécia, pode contribuir na melhora da biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos sem aumentar a competição pelo uso dos recursos (LUNDMARK *et al.*, 2021).

Um estudo com uso da DEA avaliou a redução dos impactos ambientais no consumo de alimentos, abrangendo 139 países, considerando apenas 18 países como relativamente eficientes para atender as calorias e nutrientes necessários à sua população. Os países com o melhor desempenho foram: Grécia, Turquia e China, enfatizando a importância de esforços globais na sustentabilidade ambiental do sistema alimentar, devido ao rápido crescimento populacional projetado, com o uso de uma agricultura menos prejudicial ao meio ambiente (LUCAS *et al.*, 2021). A DEA também foi utilizada para

medir o aumento de eficiência das lavouras de cacau em Gana, onde foram considerados como importantes os aspectos de bem-estar dos agricultores. Esses aspectos contemplam os programas de subsídio de insumos e o treinamento dos agricultores na aplicação adequada de agroquímicos (DANSO-ABBEAM; BAIYEGUNHI, 2020).

Também foi aplicada a DEA na rede hoteleira de Hong Kong, levando em conta apenas a infraestrutura de telecomunicação. O resultado demonstra que muitos hotéis investiram em tecnologia durante o período da pandemia, sem necessariamente ter um aumento em suas receitas. Outro aspecto é de que a capacidade da infraestrutura de telecomunicação está correlacionada de forma positivamente ao desempenho dos hotéis avaliados (YIN; YANG; YANG, 2020). Outro estudo utilizou a DEA para a avaliação do progresso das universidades da Nigéria na transferência de inovação tecnológica. Observou-se que as instituições com maior capacidade de transferência de conhecimento apresentam maior desempenho de comercialização de tecnologia e sustentabilidade financeira (FADEYI *et al.*, 2019).

2.6.2.4 A indústria e a relação com os ODS no uso do DEA

A relação da indústria com os ODS, referente ao uso da DEA, estão relacionados principalmente com a sustentabilidade e a economia circular no uso da logística reversa. Observa-se que tais aspectos continuam a ser um problema mesmo nos países em desenvolvimento (PISHDAR *et al.*, 2021). Também há fatores que estão relacionados à pandemia de Covid-19, que tem afetado de forma negativa a indústria do turismo, nesse sentido, o estudo voltado à turistas que viajam para Taiwan (TSAI, 2021).

O uso da DEA aponta que na logística reversa é importante que as empresas sintam as mudanças que ocorrem no sistema, na prática no dia a dia, não apenas em nível de princípios. Neste sentido, se buscou avaliar os três pilares da sustentabilidade, onde se percebem principalmente os aspectos ligados ao trabalho, como confiança, compromisso da gestão, trabalho descente e qualidade no desempenho social (PISHDAR *et al.*, 2021). Esses aspectos estão mais relacionados aos ODS 8 (Trabalho digno e crescimento econômico) e o ODS 12 (Produção e consumo sustentáveis).

Para o turismo em Taiwan é necessário que haja uma estratégia de operação sustentável, utilizando-se os recursos existentes, sem desperdiçar recursos ou fazer investimentos desnecessários, avaliando as preferências do turista. Nesse sentido, com o

uso da DEA, percebe-se que é necessário conciliar o crescimento da indústria do turismo e do número de viajantes. No cenário da pandemia do coronavírus, convém ao governo cooperar com outros países e informar que Taiwan possui um bom ambiente com tratamento médico adequado (TSAI, 2021). Esses aspectos estão mais voltados ao ODS 8, ODS 12 e ODS 17 (Parcerias para o desenvolvimento).

2.6.2.5 Perspectivas e oportunidades com o uso da DEA

Quanto as perspectivas e oportunidade com o uso da DEA, são abrangidos por três grupos: o mercado, a tecnologia e a indústria. O mercado, do comércio eletrônico, indústria de alimentos e da construção (LUCAS *et al.*, 2021; SHIN; KIM; KIM, 2021; WANG *et al.*, 2020a). A tecnologia é colocada sob o aspecto da transferência de tecnologia pelas universidades nigerianas, a integração entre o ambiente econômico, o uso racional de energia e o tratamento da poluição na China (FADEYI *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020a). Para a indústria nos estudos são observados os aspectos de eficiência no uso de recursos para minimizar as emissões de poluentes, a emissões de carbono associadas ao fator de desenvolvimento das cidades na China e a relação entre o desempenho financeiro e inovador de empresas associadas (STICHHAUEROVA; ZIZKA; PELLONEOVA, 2020; XU *et al.*, 2021; YANG *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2018).

Do ponto de vista das oportunidades e perspectivas na aplicação da DEA, está o desenvolvimento sustentável da indústria agroflorestal no Vietnã, visando avaliar o desempenho atual desse setor e prever o seu futuro, demonstrando que o governo precisa ter mais cuidado na formulação de políticas para essas empresas (WANG *et al.*, 2016a). No estudo de fazendas mais rentáveis e sustentáveis, foi observada a aplicação da IoT e do *edge computing*, monitorando as condições ambientais em tempo real. Percebe-se que o uso de tais recursos representa uma vantagem competitiva para as propriedades agrícolas. Estudos futuros propõem a análise desta tecnologia em rebanhos e também a aplicação do *machine learning* (PÉREZ-PONS *et al.*, 2021).

No contexto de avaliação do sistema alimentar, a DEA considerou as melhores práticas globais, as quais considera-se que ainda não foram suficientes para uma redução significativa do impacto ambiental. Há perspectiva para trabalhos que envolvam mais métricas de segurança alimentar, taxas de desnutrição, desperdícios e perda de alimentos (LUCAS *et al.*, 2021). Na cadeia de restaurantes em Taiwan, estudos futuros sugerem

incluir no uso da DEA: as despesas com energia, dados operacionais e financeiros, comparando-os com outras cadeias que tenham menus semelhantes (FANG, 2020).

O estudo de desempenho nas companhias aéreas na Ásia, com o uso da DEA, demonstra que as companhias chinesas melhoraram a sua eficiência no período de 2012 a 2016. Os dados de entrada e saída avaliados foram: o ativo total, despesas operacionais, quantidade de aeronaves em operação, assentos-quilômetro oferecidos e receita por passageiro-quilômetro. A indicação é de que estudos futuros incluam outras variáveis para avaliação no desempenho das companhias (WANG *et al.*, 2019a). Outro estudo buscou desenvolver uma metodologia para avaliar a sustentabilidade da indústria da aviação na Coreia. Foi observado que é necessária a criação de uma política de baixo custo para as transportadoras. Nesse sentido, recomenda-se a criação de valor agregado do ponto de vista da sustentabilidade da indústria de aviação (SONG; CHOI; HAN, 2020).

A técnica DEA também foi aplicada na indústria da construção da Coreia, na qual foi avaliada a relação entre a eficiência da inovação e as percepções das empresas sobre os regulamentos de saúde e segurança ocupacional. As empresas que reconhecem as regulamentações como algo positivo tendem a ser mais inovadoras. Perspectivas futuras apontam para estudos nesta área que envolvam a venda de produtos inovadores e o número de pedidos de patentes (SHIN; KIM; KIM, 2021). Outro estudo avaliou a produtividade imobiliária de 30 províncias na China continental de 2008 a 2015. Constatou-se que: a eficiência imobiliária é baixa devido à ineficiência na fase de vendas, o setor é sensível às políticas governamentais e à flutuação do índice de produtividade global. Para evitar que regiões desenvolvidas venham a diminuir, o governo pretende implementar políticas mais rígidas para desenvolver a qualidade no setor imobiliário e melhorar a capacidade de inovação empresarial (LIU *et al.*, 2021).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentadas as etapas dos procedimentos metodológicos que foram utilizados para a elaboração do trabalho. Inicialmente são descritos: a identificação do problema, a delimitação do estudo, a apresentação do setor e do fluxo de produção. Em seguida, são apresentadas as etapas do procedimento metodológico, que abrangem: a análise do inventário, formulação do problema de otimização e análise para a tomada de decisão.

3.1 Identificação do problema

A indústria em estudo não faz uso de avaliação dos impactos ambientais que são gerados na fabricação de produtos. A linha de fabricação opera com a produção de um mix de produtos, visando um melhor aproveitamento da capacidade fabril, porém não há a aplicação de modelos de otimização que demonstrem os resultados econômicos. Os tomadores de decisão desconhecem o uso das técnicas para tomada de decisão, onde é possível conciliar os critérios ambientais e econômicos.

A entrevista não estruturada ocorre quando o entrevistador possui a liberdade de conduzir a conversação na direção sob a qual considere adequada, visando explorar o assunto que está sendo pesquisado (MARCONI; LAKATOS, 2019). Em entrevista não estruturada com o gerente industrial constatou-se que o produto com a programação de produção durante todo o ano é a carreta graneleira, com capacidades de 10.500, 12.000 e 15.000 litros. Esse implemento agrícola é utilizado para o transporte de grãos e/ou adubos granulados. Posteriormente, com o supervisor do PCP, obteve-se a informação sobre a demanda diária e a combinação de produtos que possuem pedidos no mercado.

3.2 Delimitação do estudo

O estudo de caso visou selecionar o melhor mix de produção, na linha de fabricação de carretas graneleiras, em uma indústria de implementos agrícolas, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão. A Figura 18 ilustra os dois modelos de carretas graneleiras fabricados pela indústria em estudo,

sendo: uma carreta graneleira com depósito em chapa inox e tubo de descarga multiuso e a outra, com depósito em chapa carbono e tubo de descarga mecânico.

O processo de fabricação em estudo é a linha de carretas graneleiras, com capacidades de armazenamento/transporte de 10.500, 12.000 e 15.000 litros. Ao todo são cinco configurações de implementos, que são produzidas e vendidas ao longo do ano. A demanda atual é de 3 implementos por dia, sendo 2 implementos com tubo multiuso e 1 implemento com tubo mecânico. A representação das configurações do produto está ilustrada na Figura 19, acompanhado da descrição e codificação dos produtos na legenda.

Figura 18 - Dois modelos de carretas graneleiras



Fonte: acervo da indústria em estudo.

Figura 19 – Configurações do produto em estudo

PRODUTO	DEPÓSITO	ESTRUTURA	TUBO MECÂNICO	TUBO MULTIUSO	CABEÇALHO	EIXO
10.500 ● ■	CHAPA CARBONO ou INOX ● ■	CHAPA CARBONO ou INOX ● ■ ■ ■ ■ ■ FUNIL	CHAPA CARBONO ou INOX ● ■	CHAPA CARBONO ● ■ ■ ■ ■ ■	CHAPA CARBONO ● ■ ■ ■ ■ ■	CHAPA CARBONO ● ■ ■ ■ ■ ■
12.000 ■		CHAPA CARBONO ● ■ ■ ■ ■ ■				
15.000 ● ■	CHAPA CARBONO ou INOX ● ■	CHAPA CARBONO ● ■ ■ ■ ■ ■ CHASSI				

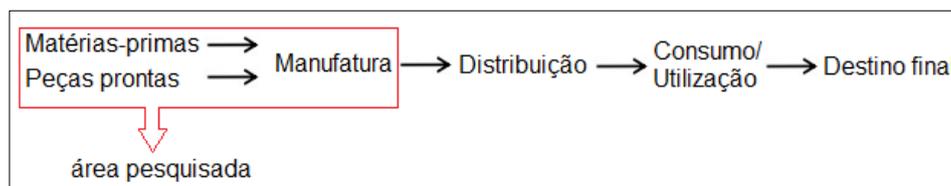
Legenda:

- Carreta graneleira 10.500, depósito, tubo multiuso, cabeçalho e eixo em chapa carbono (Código -10.5DcTmul);
- Carreta graneleira 10.500, depósito em chapa inox, tubo multiuso, cabeçalho e eixo em chapa carbono (Código -10.5DiTmul);
- Carreta graneleira 12.000, depósito e tubo mecânico em chapa inox, cabeçalho e eixo em chapa carbono (Código -12.0DiTmec);
- Carreta graneleira 15.000, depósito, tubo mecânico, cabeçalho e eixo em chapa carbono (Código -15.0DcTmec);
- Carreta graneleira 15.000, depósito em chapa inox, tubo multiuso, cabeçalho e eixo em chapa carbono (Código -15.0DiTmul);

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 20 ilustra uma visão geral do sistema da indústria, com destaque para a área que é o objeto do estudo. A ACV utilizada no estudo é de berço-a-portão. Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2014), a técnica da ACV pode ser aplicada em estudos que mediante justificativa adequada não contemplam em sua totalidade essa análise.

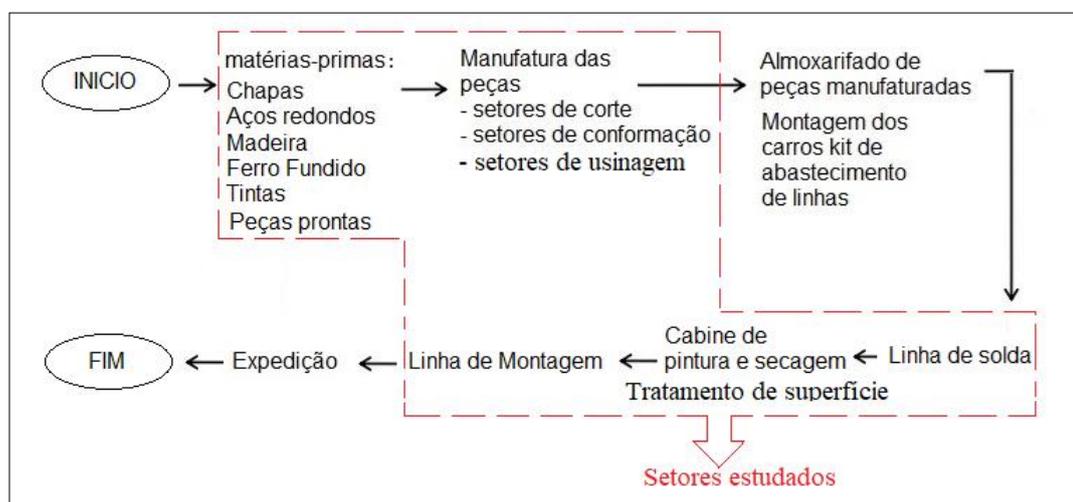
Figura 20 - Visualização total do sistema da indústria de implementos agrícolas



Fonte: elaborado pelo autor.

O estudo foi realizado desde as matérias-primas utilizadas para fabricação dos produtos até a sua finalização na linha de montagem, excluindo apenas as atividades do almoxarifado de peças, que realizam a montagem dos carros kit e atividades de abastecimento de linhas. A vista total da manufatura da empresa em estudo está ilustrada na Figura 21.

Figura 21 - Visualização total da área de manufatura da indústria de implementos agrícolas



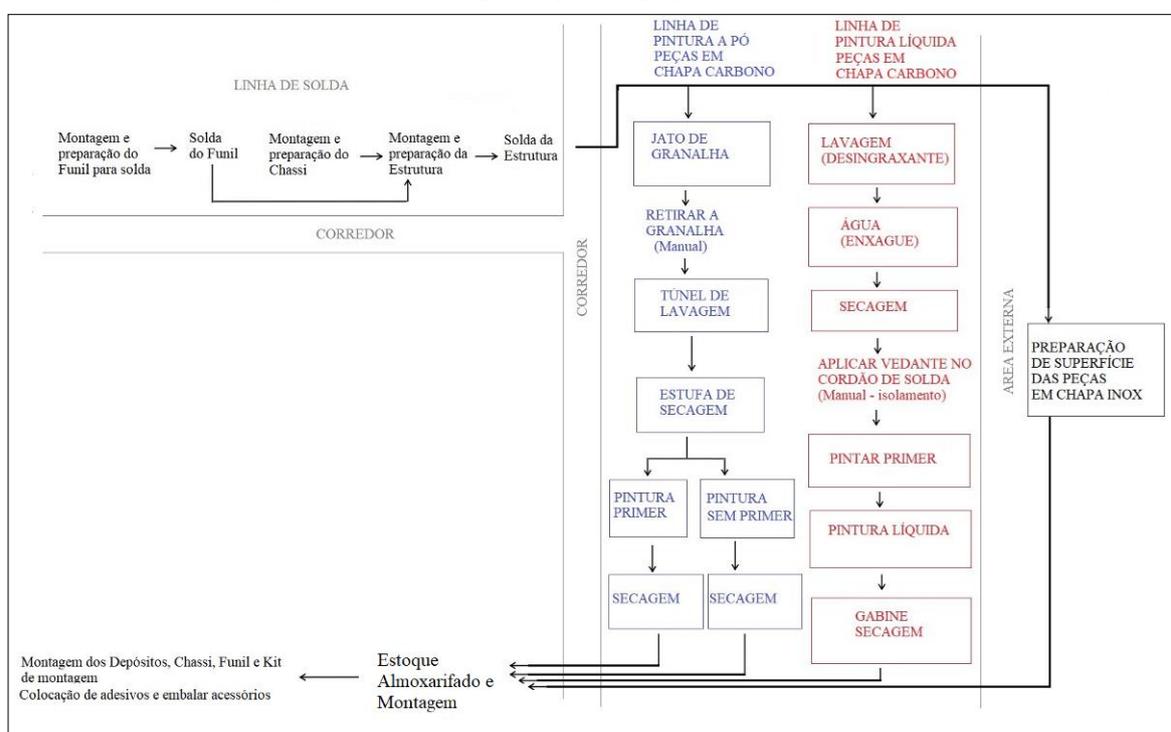
Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 O setor e o fluxo de produção

As áreas de produção da empresa estão divididas em 3 unidades fabris: I, II e III, as quais atendem as seguintes demandas:

- a) Unidade fabril I: produz as peças (itens primários) abastecendo de peças as unidades II e III;
- b) Unidade fabril II: produz componentes para terceiros, outras indústrias;
- c) Unidade fabril III: realiza os processos de soldagem, pintura e montagem final dos implementos agrícolas, produzindo também os modelos de carretas graneleiras desse estudo. Considera-se que a unidade fabril III dita o ritmo de produção para a fabricação das carretas graneleiras, assim, a PLI a ser elaborada vai abranger apenas as etapas produtivas desta unidade fabril. A Figura 22 ilustra o esboço do *layout* e o fluxo principal de produção dos modelos de produtos em estudo.

Figura 22 - Fluxo principal de peças Unidade fabril III



Fonte: elaborado pelo autor com base na indústria em estudo.

O último processo, que é a montagem da carreta graneleira, consiste na operação que possui o tempo mais elevado de fabricação. Os tempos unitários de cada um dos produtos estudados, referente a operação do posto de montagem final, estão colocados a seguir, na Tabela 8.

Conforme os dados informados pelo PCP, a Tabela 8 representa também as 7 alternativas de demanda diária de produtos que são possíveis de serem fabricadas, considerando que por dia são fabricados 3 implementos, sendo: 2 carretas graneleiras com

tubo multiuso e 1 carreta graneleira com tubo mecânico. A indústria atualmente não produz produtos de apenas um único modelo por dia, pois visa atender a demanda de pedidos dos clientes, configurando a programação da produção em um mix de produtos.

Tabela 8 - Demanda de produtos, lucratividade e ritmo de produção

Produtos	Alternativas diárias de demanda							Lucratividade / m ² de produto (R\$)	Ritmo da montagem de 1m ² de produto em horas
	Alternativas								
	1	2	3	4	5	6	7		
10.5DcTmul	2	2	1					R\$ 256,68	0,0516
10.5DiTmul				2	2			R\$ 330,55	0,0586
12.0DiTmec		1	1	1			1	R\$ 373,87	0,0787
15.0DcTmec	1				1		1	R\$ 260,93	0,0345
15.0DiTmul			1				2	R\$ 394,27	0,0552
Total de produtos/dia	3	3	3	3	3	3	3		
Ritmo de produção do mix (h/dia)	0,1377	0,1819	0,1855	0,1959	0,1517	0,1891	0,1449		

Fonte: elaborado pelo autor com base na indústria em estudo.

A última linha da Tabela 8 apresenta o total de horas que são necessárias para fabricar 1m² de cada mix de produtos. O exemplo do cálculo desse tempo de montagem final está representado na Equação (1):

$$\text{Tempo do mix (h)} = (2 \text{ Prod. } 10.5\text{DcTmul} \times 0,0516 \text{ h}) + (1 \text{ Prod. } 15.0\text{DcTmec} \times 0,0345 \text{ h})$$

$$\text{Tempo do mix (h)} = 0,1377 \text{ horas/m}^2. \quad (1)$$

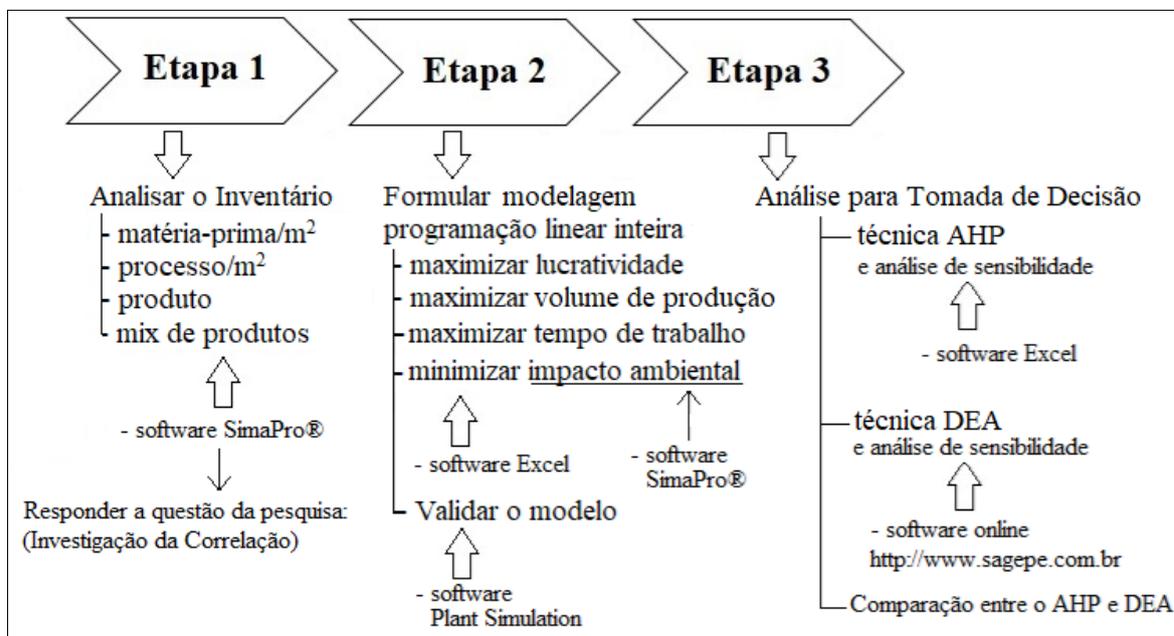
Na Tabela 8, o tempo de produção dos três produtos da alternativa 4 de demanda diária é mais elevado (0,1959 h/dia). Este tempo será utilizado para a restrição do tempo disponível de fabricação na formulação do problema da programação linear inteira.

3.3 A metodologia para o desenvolvimento do trabalho

A metodologia das etapas seguiu como base principal a norma ABNT NBR ISO 14040 (2014) abrangendo em seu conteúdo as quatro fases da ACV: definir o objetivo e escopo, analisar o inventário, avaliar o impacto e interpretar os resultados. Ainda, dentre os autores, a principal contribuição está em Lachtermacher (2018), quanto à elaboração da modelagem da programação linear inteira. A análise para a tomada de decisão com uso da técnica AHP seguiu as etapas descritas nos estudos dos autores Moraes e Santaliestra (2008) e Deshmukh e Hiremath (2018), e a técnica DEA seguiu os autores Piran, Lacerda e

Camargo (2018), quanto a elaboração das etapas. A Figura 23 ilustra o mapa mental das etapas para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 23 – Mapa mental das etapas para o desenvolvimento do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor.

Para se alcançar o objetivo do trabalho, que consiste em selecionar o melhor mix de produção na linha de produção, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão, foi necessário realizar a análise de inventário para avaliar o impacto ambiental, formular a modelagem da programação linear inteira para identificar as alternativas do mix de produção para maximizar a lucratividade, volume de produção, tempo de trabalho e minimizar o impacto ambiental, e elaborar a matriz de decisão com aplicação das técnicas AHP e DEA, para identificar o melhor resultado do mix de produção sob o ponto de vista dos critérios ambientais e econômicos. Os subcapítulos a seguir, descrevem de forma detalhada cada uma das etapas, do mapa mental, para o desenvolvimento do trabalho.

3.3.1 Análise de Inventário

Esta etapa representa a coleta de dados primários, junto ao processo de fabricação das carretas graneleiras, compreendendo o período que iniciou em março até maio 2020. O inventário do ciclo de vida tem o objetivo de identificar e quantificar as intervenções

ambientais relacionadas aos sistemas, colocando os resultados em uma lista de entradas e saídas ambientais (ROY; MIAH; ZAFAR, 2019).

Os dados foram coletados com o uso de: lista de estrutura de produto, tempos de operações, observação do fluxo do processo de fabricação e entrevista não estruturada com o gerente industrial e supervisores das áreas de PCP, solda e pintura.

Outra fonte de dados utilizada foi a base de dados do SimaPro® versão 9.0.0.49, onde foram consultadas as bibliotecas (banco de dados):

a) *Ecoinvent 3 – allocation, cut-off by classification – system*: dados compilados em novembro de 2018. Dentre os vários setores que esse banco de dados contém, está incluso a produção de metal;

b) USLCI: representa o Banco de Dados do Inventário do Ciclo de Vida dos Estados Unidos (EUA). A biblioteca foi atualizada em setembro de 2015, contém módulos de dados que quantificam os fluxos de material e energia;

c) *Industry data 2.0*: os conjuntos de dados foram atualizados e adicionados em abril de 2015, setembro de 2015, março de 2016, dezembro de 2017 e abril de 2018. Contém dados coletados por associações do setor, como *Plastics Europe*, *World Steel* e ERASM (*Environment and Health - Risk Assessment & Management*).

Essas bibliotecas do SimaPro®, forneceram os dados referentes as matérias-primas e processos de produção, utilizados pela indústria em estudo. Percebe-se que o período de atualização desses dados abrange abril de 2015 até novembro de 2018.

Os valores referentes as matérias-primas utilizadas para a fabricação de 1m² de produto (carreta graneleira), estão listados na Tabela 9. Os processos utilizados estão representados na Tabela 10, onde:

Tabela 9 - Materiais utilizados por m² de produto

MATERIAIS	un.	10.5DcTmul	10.5DiTmul	12.0DiTmeci	15.0DcTmec	15.0DiTmul
Aço Carbono	Kg	103,2165	69,7484	55,8541	106,2000	72,9938
Aço Inox	Kg	0,0586	25,1762	37,8624	0,0508	34,2421
PVC Rígido NBR7362	Kg	2,7527	2,7527	0,0000	0,0000	2,7527
Tinta líquida para acabamento	Kg	0,0089	0,1503	0,1503	0,0089	0,1527

Fonte: elaborado pelo autor.

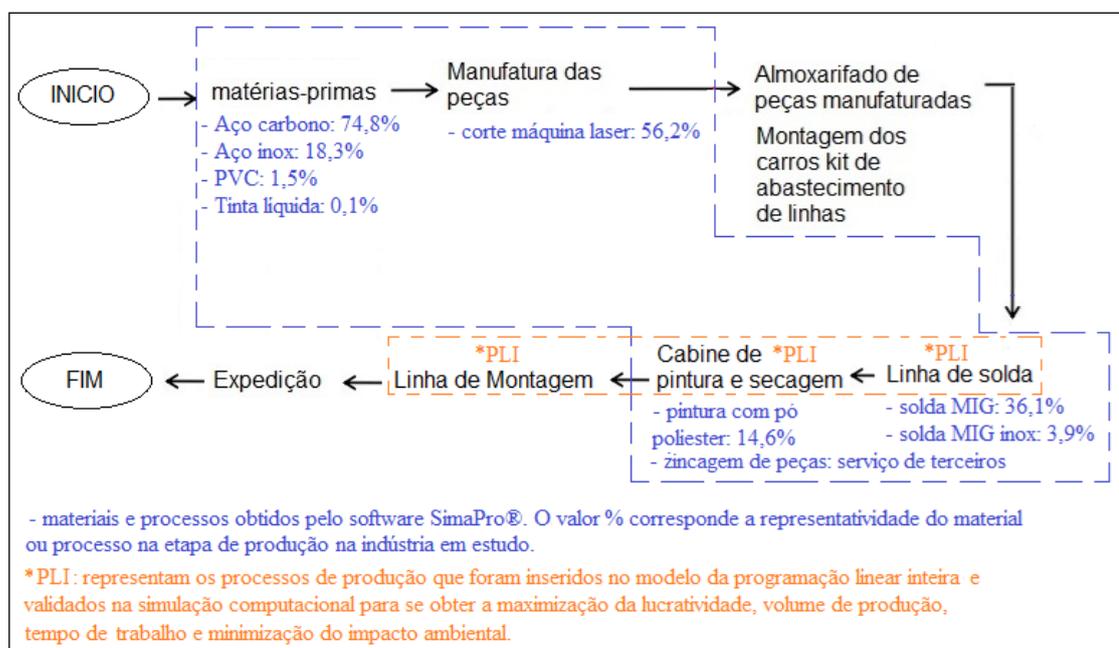
Tabela 10 - Processos de fabricação utilizados por m² de produto

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	un.	10.5DcTmul	10.5DiTmul	12.0DiTmec	15.0DcTmec	15.0DiTmul
Pintura com pó poliester	m ²	0,7064	0,3102	0,1880	0,7539	0,3212
Corte com máquina laser	h	0,0905	0,1100	0,1106	0,1073	0,1175
Solda MIG	m	8,2091	7,6495	5,2768	8,6174	7,5135
Solda MIG Inox	m	0,0000	1,0963	1,4728	0,0000	1,1454
Zincagem de peças	m ²	0,1821	0,1821	0,0281	0,1342	0,1821

Fonte: elaborado pelo autor.

A representatividade dos materiais e processos obtidos no software SimaPro®, e também os setores onde foi aplicado o modelo de programação linear inteira estão ilustrados na Figura 24. O desmembramento dos mesmos está descrito nos subcapítulos a seguir.

Figura 24 - Representação dos materiais e processos aplicados no estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados são interpretados com uso de tabelas e gráficos, abrangendo principalmente o impacto ambiental: a saúde humana, ecossistemas e escassez de recursos. Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2014, p. vii), “a interpretação do ciclo de vida é a fase final do procedimento de ACV, na qual os resultados [...] são sumarizados e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com a definição de objetivo e escopo”.

3.3.2 Análise de cenários e avaliação do impacto ambiental por matéria-prima

A análise de cenários e avaliação de impacto ambiental, é apresentada em 4 níveis:

- 1) cenário de matéria-prima/m² de produto;
- 2) cenário de processo/m² de produto;
- 3) cenário por produto;
- 4) cenário por mix de produtos.

A análise desses cenários foi realizada com uso do software SimaPro®, o qual foi disponibilizado através de uma licença *Faculty*, disponibilizada gratuitamente a professores e alunos. A análise dos impactos foi realizada com a utilização da metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H. A escolha de tal metodologia é justificada pelo tutorial do SimaPro®, que a apresenta com uma metodologia mais comumente utilizada para medir o impacto ambiental do ponto de vista moderado.

Na ABNT NBR ISO 14040, a análise de cenários corresponde à etapa de avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV), visando a obtenção de “informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental” (ABNT NBR ISO 14040, 2014, p. vii).

Os indicadores das categorias de impacto podem descrever um problema ambiental (*midpoint*) ou avaliar o dano causado sobre o domínio ou área de proteção (*endpoint*), abrangendo os aspectos de: saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos. As duas categorias são complementares, sendo que o *midpoint* tem uma relação mais forte com os fluxos ambientais, o *endpoint* fornece melhores informações sobre a relevância ambiental (HAUSCHILD; HUIJBREGTS, 2015, *apud* RIVM, 2017).

A Tabela 11 apresenta as categorias de impacto e danos, obtidos a partir da metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H.

Tabela 11 - Categorias de impactos e danos de acordo com a metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H

Categoria de impacto (<i>midpoints</i>)	Unidade	Categoria danos (<i>endpoints</i>)		
		Saúde humana	Ecossistemas	Recursos
Aquecimento global, Saúde humana	DALY	X		
Aquecimento global, ecossistemas terrestres	species.yr			X
Aquecimento global, ecossistemas de água doce	species.yr			X
Destruição do ozônio estratosférico	DALY	X		
Radiação ionizante	DALY	X		

Formação de ozônio, Saúde humana	DALY	X	
Formação de partículas finas	DALY	X	
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	species.yr		X
Acidificação terrestre	species.yr		X
Eutrofização de água doce	species.yr		X
Eutrofização marinha	species.yr		X
Ecotoxicidade terrestre	species.yr		X
Ecotoxicidade em água doce	species.yr		X
Ecotoxicidade marinha	species.yr		X
Toxicidade cancerígena humana	DALY	X	
Toxicidade não carcinogênica humana	DALY	X	
Uso da terra	species.yr		X
Escassez de recursos minerais	USD2013		X
Escassez de recursos fósseis	USD2013		X
Consumo de água, Saúde humana	DALY	X	
Consumo de água, ecossistema terrestre	species.yr		X
Consumo de água, Ecossistemas aquáticos	species.yr		X

Fonte: elaborado pelo autor com base no SimaPro®.

Os resultados da análise de impacto foram apresentados por meio de gráficos, gerados pelo software SimaPro®.

3.3.2.1 Análise de cenários por matéria-prima

Inicialmente foi elaborada uma análise de cenários com as 4 matérias-primas utilizadas no processo de fabricação das carretas graneleiras, sendo: o aço carbono, o aço inox, o material em PVC (Policloreto de vinila) e a tinta líquida para acabamento. Esses são os materiais que mais são utilizados na fabricação do produto, corresponde a 94,7% (102,8 kg/m² de produto) do total de materiais utilizados. O aço carbono, o aço inox e o material em PVC também são os materiais que mais apresentam variação em relação ao seu uso, entre um modelo e outro de produto. A Tabela 12 demonstra em % o total de materiais utilizados para a fabricação dos 5 modelos de carretas graneleiras.

Tabela 12 - Composição % das matérias-primas nos produtos

Materiais	10.5DcTmul	10.5DiTmul	12.0DiTmec	15.0DcTmec	15.0DiTmul	Média	Desvio Padrão
Aço carbono	92,5%	67,3%	55,8%	96,0%	62,5%	74,8%	18,2%
Aço Inox	0,1%	24,3%	37,8%	0,05%	29,3%	18,3%	17,4%
PVC	2,5%	2,7%	0,0%	0,0%	2,4%	1,5%	1,4%
Tinta líquida para acabamento	0,01%	0,15%	0,15%	0,01%	0,13%	0,1%	0,1%

Subtotal % total	95,0%	94,4%	93,8%	96,0%	94,3%	94,7%	0,8%
Outros materiais	5,0%	5,6%	6,2%	4,0%	5,7%	5,3%	0,8%
Total materiais	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 12 estão identificadas as 4 matérias-primas utilizadas no processo de fabricação das carretas graneleiras, sendo: o aço carbono, o aço inox, o material em PVC e a tinta líquida para acabamento. Também está representado o percentual de cada um destes materiais utilizados por produto, a média e o desvio padrão. Para determinar a quantidade percentual de cada um dos materiais da Tabela 12, foi utilizada a Equação (2).

$$(Peso\ do\ material / Soma\ total\ dos\ pesos\ dos\ materiais) \times 100 = \% \quad (2)$$

As matérias-primas identificadas no SimaPro®, contém as seguintes descrições:

- a) Aço carbono: dados coletados por especialistas da indústria siderúrgica, levam em consideração dados Globais (GLO), referentes ao ano de 2017, onde o aço é laminado em um laminador a quente. Esse aço é utilizado na fabricação de ferramentas, matrizes, componentes para motores, acionamentos, equipamentos, transmissões, etc.;
- b) Aço inox: o conjunto de dados abrange todas as etapas relevantes do processo/tecnologias Europeias do inventário do berço ao portão, com uma alta qualidade geral dos dados, que foram coletados por especialistas da indústria de aço inoxidável, no período de 2008 a 2012. Estão inclusos os processos de mineração, fundição, fabricação de produtos metálicos, energia relevante e processos de transporte;
- c) PVC: o conjunto de dados considera a produção de tubos de PVC, incluindo a produção de resina de PVC, transporte da resina para o conversor, o próprio processo de conversão e embalagem do produto acabado para envio posterior ao cliente;
- d) Tinta líquida para acabamento: o inventário do produto é modelado para o Resto do Mundo (RoW - *Rest-of-World*), com data final do inventário em 2018.

A análise de matéria-prima utilizada, considerou a quantidade de cada um dos materiais para fabricação de 1m² de produto: o aço carbono, o aço inox, o material em PVC e a tinta líquida para acabamento.

3.3.2.2 Análise de cenário por processos de fabricação

A análise de cenários com os processos utilizados por m² para fabricação das carretas graneleiras, sendo eles: o corte com máquina de corte laser de 6.000W de potência, que representam 56,2% do corte de materiais. A preparação para a solda e soldagem, a soldagem MIG e MIG Inox, correspondem a 36,1% e 3,9% respectivamente. O processo de Pintura com pó poliéster representa em média 14,6% e a tinta líquida 4,9% do total de processos de pintura e preparação de superfícies. Foram identificadas no SimaPro®, com as seguintes descrições:

- a) Pintura com pó poliéster: representa a fabricação da categoria de equipamentos de transporte, utilizando o banco de dados USLCI (EUA). Consiste no processo unitário de pintura, com base em 1m² de área da superfície;
- b) Corte com máquina de corte laser: o inventário considera o modelo Global (GLO), banco de dados *ecoinvent 3*, processo de corte laser em máquina com 6.000W de potência;
- c) Solda MIG: inventário é modelado para o Resto do Mundo (RoW), considera o processo de soldagem do aço com gás de proteção, banco de dados *ecoinvent 3*;
- d) Solda MIG Inox: alteração realizada em relação ao processo de solda MIG, onde foram alteradas as quantidades dos gases de proteção;
- e) Zincagem de peças: o inventário considera o modelo Global (GLO). Na empresa em estudo, esse processo é realizado por empresas terceirizadas.

A Tabela 13 representa o total de processos que abrangem a preparação de superfícies e pintura na indústria em estudo. Com base no banco de dados do SimaPro®, foi possível identificar o processo de Pintura com pó poliéster, que na indústria em estudo representa em média 14,6% e a tinta líquida que representa 4,9%.

Tabela 13 - Composição % dos processos de preparação de superfície e pintura

Processos de Preparação de superfície e Pintura	Participação % dos processos						
	10.5DcTmul	10.5DiTmec	12.0DiTmeci	15.0DcTmec	15.0DiTmul	Média	Desvio Padrão
Preparação de superfície	18,7%	32,9%	36,8%	20,5%	29,1%	27,6%	7,8%
Estufa de cura	27,0%	15,5%	13,0%	30,0%	16,0%	20,3%	7,6%
Pintura com pó poliéster	23,1%	10,5%	7,1%	21,6%	10,9%	14,6%	7,2%
Estufa de desumidificação	14,2%	9,9%	8,7%	15,1%	10,3%	11,6%	2,8%
Tratamento de superfície inox	0,0%	16,5%	18,9%	0,0%	17,6%	10,6%	9,7%
Jato de granalha	15,5%	8,0%	7,9%	11,3%	8,9%	10,3%	3,2%
Pintura líquida	1,5%	6,7%	7,5%	1,5%	7,3%	4,9%	3,1%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100,0%	0,0%

Fonte: elaborado pelo autor.

Para determinar a quantidade percentual de cada um dos processos das Tabelas 13, 14 e 15, foi utilizada a Equação (3).

$$(\text{Tempo do processo de fabricação} / \text{Soma total dos tempos dos processos}) \times 100 = \% \quad (3)$$

A Tabela 14 apresenta o total de processos que abrangem o processo inicial de corte na indústria em estudo. São quatro os equipamentos onde se inicia o corte dos materiais: corte laser, plasma, serra e guilhotina. O processo identificado no SimaPro® foi o corte com laser, que na indústria corresponde a 56,2% destes processos de corte.

Tabela 14 - Composição % dos processos de fabricação na etapa inicial de corte

Processos de Fabricação (Etapa inicial, corte de materiais)	Participação % dos processos de corte						Média	Desvio Padrão
	10.5DcTmul	10.5DiTmec	12.0DiTmec	15.0DcTmec	15.0DiTmul			
Corte com Laser	48,7%	56,6%	61,7%	57,1%	57,2%	56,2%	4,7%	
Corte com Plasma	28,7%	21,6%	17,4%	23,1%	21,6%	22,5%	4,1%	
Corte com Serra	22,6%	21,8%	20,9%	19,8%	21,2%	21,3%	1,0%	
Corte com Guilhotina	12,7%	8,2%	6,5%	16,8%	7,8%	10,4%	4,3%	
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	0,0%	

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 15 demonstra o total de processos que abrangem a preparação para a soldagem e o processo de soldagem. O processo de preparação para a solda é apenas a montagem das peças no dispositivo de solda. A montagem é realizada de forma manual pelo soldador, mas não é executada a solda. Os processos de solda MIG e solda MIG inox consideram apenas a operação de solda com o arco de solda aberto, na qual o equipamento de solda está efetivamente trabalhando.

Tabela 15 - Composição % dos processos de preparação para solda e soldagem

Processo de Preparação para solda e Soldagem	Participação % dos processos					Média	Desvio Padrão
	10.5DcTmul	10.5DiTmec	12.0DiTmec	15.0DcTmec	15.0DiTmul		
Preparação para a solda	60,1%	58,2%	59,3%	63,6%	58,7%	60,0%	2,1%
Solda MIG	39,9%	36,6%	31,8%	36,4%	35,8%	36,1%	2,9%
Solda MIG Inox	0,0%	5,2%	8,9%	0,0%	5,5%	3,9%	3,9%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0%

Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.2.3 Análise de cenários por mix de produtos

A análise de cenários por mix de produtos, foi realizada considerando um total de 7 alternativas (Tabela 16). Para um melhor aproveitamento da capacidade fabril, o PCP busca realizar a programação da fábrica com base no mix de produtos, sendo essas as 7 alternativas utilizadas atualmente.

Tabela 16 - Alternativas analisadas com base na demanda do mix de produtos

Alternativas	Mix de Produtos (demanda diária)					Total
	10.5DcTmul	10.5DiTmul	12.0DiTmeci	15.0DcTmec	15.0DiTmul	
1	2			1		3
2	2		1			3
3	1		1		1	3
4		2	1			3
5		2		1		3
6			1		2	3
7				1	2	3

Fonte: elaborado pelo autor.

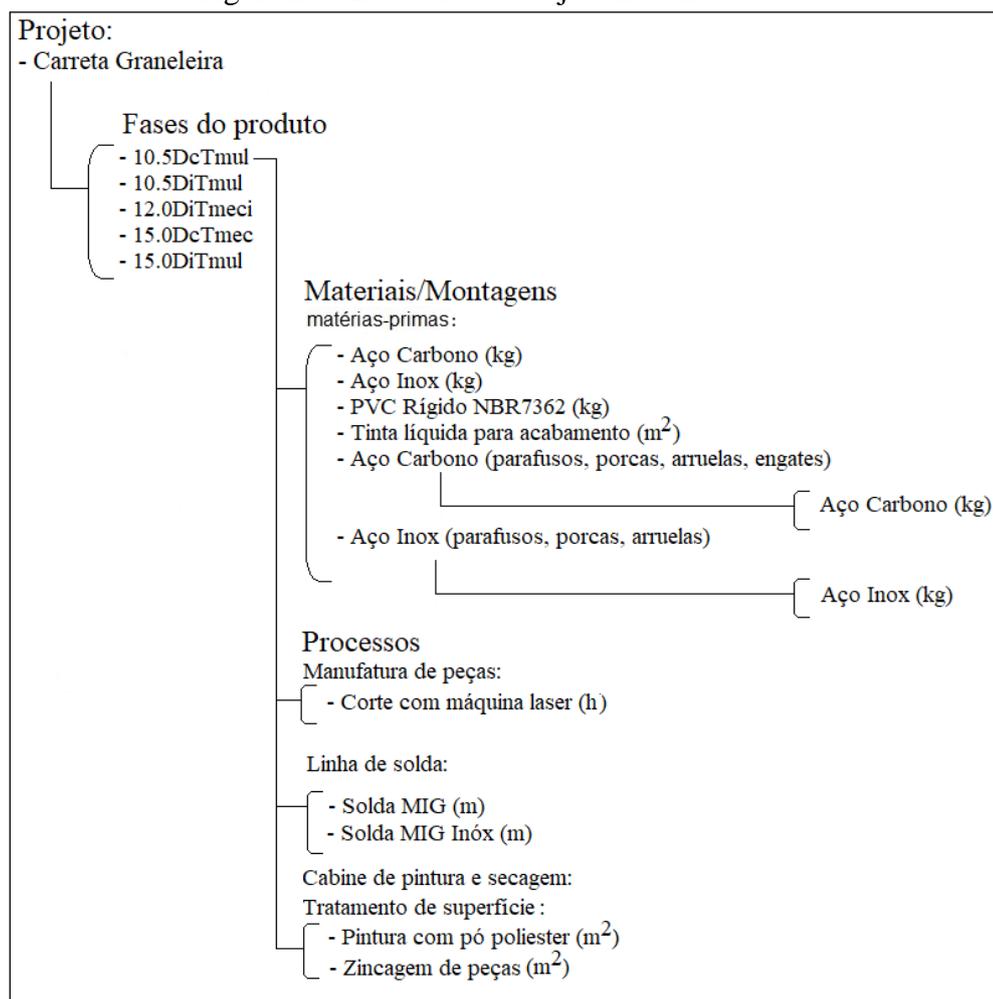
Os mix de produtos foram inseridos no software SimaPro®, considerando os dados da Tabela 16 referente a quantidade de produtos.

3.3.2.4 Montagem dos cenários no software SimaPro®

A Figura 25 representa o fluxograma da estrutura do projeto que foi elaborada com o uso do software SimaPro®. Segue exemplificada de forma escalonada apenas a fase do produto 10.5DcTmul. Para os demais produtos a elaboração se procedeu da mesma forma.

Com uso do software SimaPro®, inicialmente foi criado o projeto com o nome de carreta graneleira, e adicionado ao mesmo as 5 categorias de fases do produto, denominadas: 10.5DcTmul, 10.5DiTmul, 12.0DiTmeci, 15.0DcTmec e 15.0DiTmul. Em seguida foram identificados dados de entrada/saída, como materiais/montagens: matérias-primas representadas pelos itens da Tabela 9; e os processos: processos de fabricação representados pelos itens da Tabela 10.

Figura 25 - Estrutura do Projeto no SimaPro®



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.3 Formular o modelo da programação linear inteira

A formulação do modelo matemático seguiu o método da programação linear inteira (PLI), pois sua área de aplicação abrange a administração da produção e alocação de recursos limitados, até porque os recursos não são suficientes para que todas as atividades sejam executadas nos níveis mais elevados (ANDRADE, 2015; LACHTERMACHER, 2018).

Foi possível identificar 4 cenários. A numeração dos cenários segue a sequência das alternativas do mix de produção, com origem no subcapítulo 3.2.1, sendo:

a) Alternativa 8 – maximizar o lucro: segue o critério de 3 produtos por dia, sendo: 2 carretas graneleiras com tubo multiuso e 1 carreta graneleira com tubo mecânico, para

determinar quais os modelos de produtos a serem fabricados, em um turno de trabalho, visando obter o máximo de lucratividade;

b) Alternativa 9 – maximizar o volume de produção: identificar qual a quantidade máxima de produtos que a unidade fabril III consegue produzir em um turno de trabalho. Nesta alternativa é considerado o critério de fabricar no máximo 2 carretas graneleiras de um mesmo modelo com tubo multiuso e/ou 1 carreta graneleira de um mesmo modelo com tubo mecânico, podendo o volume de produção ser superior a 3 implementos por dia;

c) Alternativa 10 – maximizar o tempo de trabalho na linha de produção: determinar qual a configuração ideal de produtos a serem fabricados, de forma que seja possível obter o melhor aproveitamento do tempo de trabalho nos postos localizados na unidade fabril III, seguindo o critério de: 2 carretas graneleiras com tubo multiuso e 1 carreta graneleira com tubo mecânico, totalizando 3 implementos por dia;

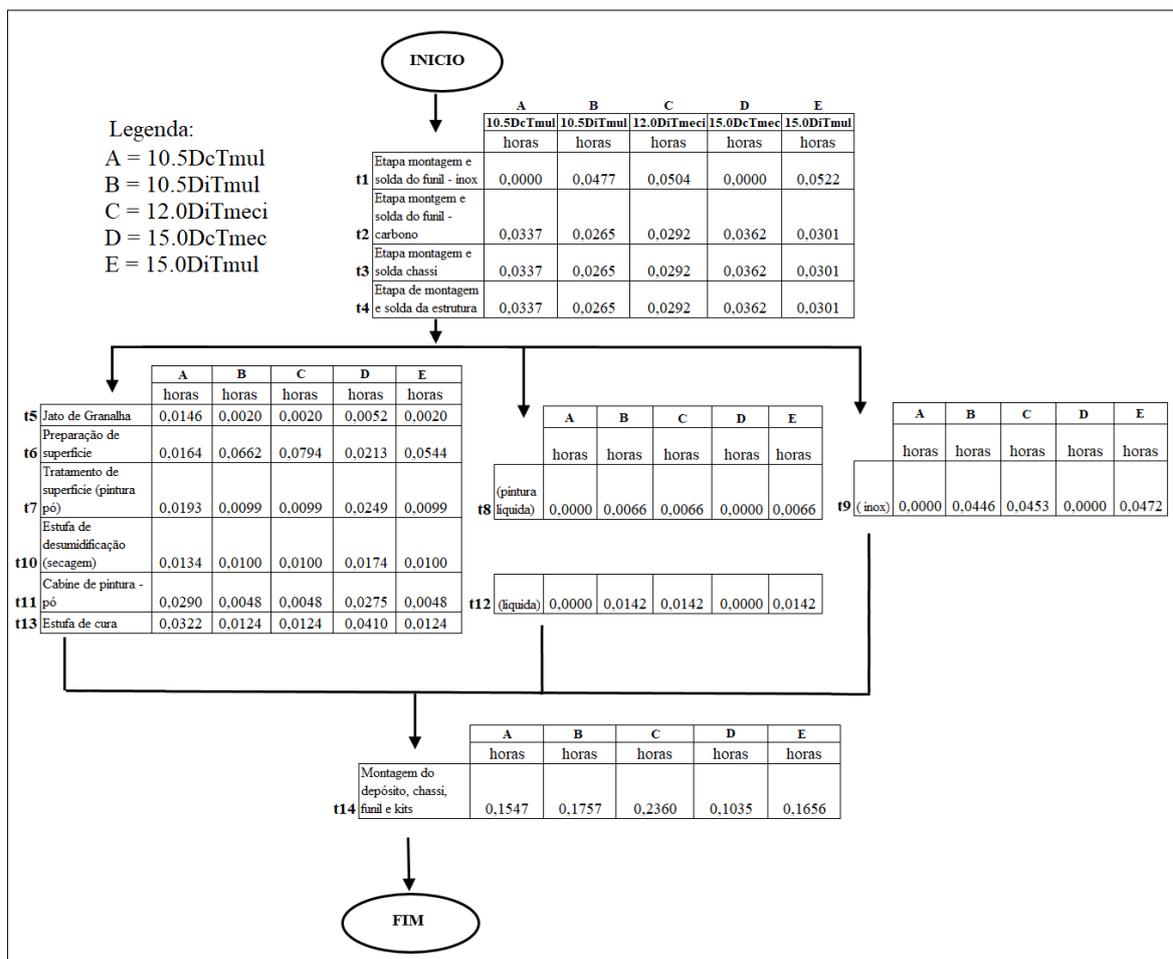
d) Alternativa 11 – o menor impacto ambiental (minimizar): identificar qual é o mix de produção que gera o menor impacto ambiental, seguindo o critério de: 2 carretas graneleiras com tubo multiuso e 1 carreta graneleira com tubo mecânico, totalizando 3 implementos por dia.

Inicialmente foram coletados os tempos (em horas) para a fabricação de 1m^2 de cada um dos produtos e representados no fluxo de produção com as respectivas etapas, demonstrado na Figura 26, na página seguinte.

Os próximos passos foram:

1) elaborar a modelagem matemática: estabelecer a função objetivo, as variáveis e restrições. O estudo aplica quatro funções objetivos diferentes, mas utiliza as mesmas restrições e formulações para comparar o resultado final. O estudo de sequenciamento de corte em um sistema de fabricação modular também fez uso de duas funções objetivo diferentes, utilizou as mesmas restrições e formulações para comparação (MOENGIN *et al.*, 2019);

2) elaborar o modelo com uso da ferramenta *solver* (*software Excel*). Como exemplo de uso dessa ferramenta, tem-se a utilização do *solver*, em uma fábrica de paletes de madeira, para implementar a análise de custo e emissão de carbono (WATTANASIRISETH; KRAIRIT, 2019).

Figura 26 - Fluxo e tempos em horas de produção para 1m² dos produtos

Fonte: elaborado pelo autor.

Segue a configuração inicial do problema, com base nas restrições da Figura 26.

Inicialmente segue a identificação dos produtos:

A = quantidade do produto 10.5DcTmul;

B = quantidade do produto 10.5DiTmul;

C = quantidade do produto 12.0DiTmec;

D = quantidade do produto 15.0DcTmec;

E = quantidade do produto 15.0DiTmul;

Considerando A, B, C, D, E ≥ 0 e inteiras

A identificação dos tempos de cada etapa de produção:

t1 = tempo em horas da etapa montagem e solda do funil (aço inox);

t2 = tempo em horas da etapa montagem e solda do funil (aço carbono);

t3 = tempo em horas da etapa montagem e solda chassi;

t_4 = tempo em horas da etapa de montagem e solda da estrutura;
 t_5 = tempo em horas da etapa de jato de granalha;
 t_6 = tempo em horas da etapa de preparação de superfície;
 t_7 = tempo em horas da etapa de tratamento de superfície (pintura pó);
 t_8 = tempo em horas da etapa de tratamento de superfície (pintura líquida);
 t_9 = tempo em horas da etapa de tratamento de superfície (inox);
 t_{10} = tempo em horas da etapa de desumidificação (secagem);
 t_{11} = tempo em horas da etapa de cabine de pintura (pó);
 t_{12} = tempo em horas da etapa de cabine de pintura (líquida);
 t_{13} = tempo em horas da etapa da estufa de cura;
 t_{14} = tempo em horas da etapa de montagem do depósito, chassi, funil e kits;
 b_1 = restrição de horas disponíveis da fábrica em 1 turno de trabalho.

As etapas com os tempos t_1 e t_2 são realizadas por um operador. Ocorre a fabricação do funil em aço inox ou aço carbono no mesmo posto de trabalho. Assim, pode-se calcular a média dos tempos, não havendo sobreposição dos mesmos, representado na Equação (4):

$$T1 = (t1 + t2)/2 \quad (4)$$

onde tem-se $T1$ = tempo em horas da etapa montagem e solda do funil.

Os tempos das etapas: t_7 , t_8 , t_9 são operações de tratamento de superfície que ocorrem em paralelo. Ambas trabalham ao mesmo tempo para atender diferentes componentes. Assim, o tempo a ser considerado para essa etapa consiste na soma dos tempos, pois há três recursos produtivos disponíveis, representado na Equação (5):

$$T7 = t7 + t8 + t9 \quad (5)$$

onde tem-se $T7$ = total das horas de tratamento de superfície.

Os tempos das etapas t_{11} e t_{12} são operações de pintura que ocorrem em paralelo. Ambas podem trabalhar ao mesmo tempo para atender diferentes componentes. Assim, somam-se os tempos, pois tem-se dois recursos produtivos disponíveis, representado na Equação (6):

$$T11 = t11 + t12 \quad (6)$$

onde tem-se $T11$ = total das horas de cabine de pintura.

Considera-se que para a realização da etapa t_{14} há três operadores no posto de trabalho, representado na Equação (7):

$$t14 = t14 / 3 \text{ operadores} \quad (7)$$

Seguindo a descrição das restrições lineares e da função objetivo, a Equação (8) demonstra a modelagem da LP para um problema de maximização:

Função objetivo:

$$\text{Maximizar } Z = c1A + c2B + c3C + c4D + c5E \quad (8)$$

Onde $c1$, $c2$, $c3$, $c4$ e $c5$ são variáveis utilizadas em cada alternativa. Na alternativa 8 correspondem ao lucro por m^2 de produto. Na alternativa 9 correspondem a quantidade de produtos. Na alternativa 10 corresponde ao tempo em horas para fabricar $1m^2$ de produto. Na alternativa 11 corresponde ao impacto ambiental para fabricar $1m^2$ de produto.

Sujeito a restrições:

$$t1A + t1B + \dots + tn \leq b1$$

$$t2A + t2B + \dots + tn \leq b2$$

⋮

$$tnA + tnB + \dots + tn \leq bm$$

$$A, B, C, D, E \geq 0 \text{ e inteiras}$$

Na definição das restrições de tempo tem-se a capacidade disponível de cada etapa de produção que é de 0,1959 horas/turno para a produção de $1m^2$ de três implementos, correspondente a restrição $b1$.

Com base nas Equações (2 até 6) e na Figura 35, foi formulado o problema da programação linear inteira. Inicialmente para maximizar a lucratividade, tem-se:

Função objetivo da alternativa 8:

$$\text{Maximizar } Z = 256,68A + 330,55B + 373,87C + 260,93D + 394,27E$$

Sujeito a:

$$0,0169A + 0,0371B + 0,0398C + 0,0181D + 0,0411E \leq 0,1959 \quad (1)$$

$$0,0233A + 0,0340B + 0,0379C + 0,0256D + 0,0312E \leq 0,1959 \quad (2)$$

$$0,0233A + 0,0340B + 0,0379C + 0,0256D + 0,0312E \leq 0,1959 \quad (3)$$

$$0,0146A + 0,0020B + 0,0020C + 0,0052D + 0,0020E \leq 0,1959 \quad (4)$$

$$0,0164A + 0,0662B + 0,0794C + 0,0213D + 0,0544E \leq 0,1959 \quad (5)$$

$$0,0193A + 0,0611B + 0,0617C + 0,0249D + 0,0637E \leq 0,5877 \quad (6)$$

$$0,0134A + 0,0100B + 0,0100C + 0,0174D + 0,0100E \leq 0,3918 \quad (7)$$

$$0,0290A + 0,0190B + 0,0190C + 0,0275D + 0,0190E \leq 0,3918 \quad (8)$$

$$0,0322A + 0,0124B + 0,0124C + 0,0410D + 0,0124E \leq 0,5877 \quad (9)$$

$$0,0516A + 0,0586B + 0,0787C + 0,0345D + 0,0552E \leq 0,1959 \quad (10)$$

$$A \leq 2 \quad (11)$$

$$B \leq 2 \quad (12)$$

$$C \leq 1 \quad (13)$$

$$D \leq 1 \quad (14)$$

$$E \leq 2 \quad (15)$$

$$A + B + C + D + E = 3 \quad (16)$$

$$A, B, C, D, E \geq 0 \text{ e inteiras} \quad (17)$$

Desta forma, tem-se a função objetivo, que consiste em maximizar a lucratividade, em que $256,68A$ corresponde a lucratividade unitária do produto A, $330,55B$ corresponde a lucratividade unitária do produto B, $373,87C$ corresponde a lucratividade unitária do produto C, $260,93D$ corresponde a lucratividade unitária do produto D e $394,27E$ corresponde a lucratividade do produto E. Foram montadas quinze restrições, onde:

- a) restrição (1): representa o valor do tempo de $0,0169A$ horas da etapa 1(T1) para fabricar 1m^2 do produto A, somado ao valor do tempo de $0,0371B$ horas da etapa 1(T1) para fabricar 1m^2 do produto B, somado ao tempo de $0,0398C$ horas da etapa 1(T1) para fabricar 1m^2 do produto C, somado ao tempo de $0,0181D$ da etapa 1(T1) para fabricar 1m^2 do produto D e somado ao valor do tempo de $0,0411E$ da etapa 1(T1) para fabricar 1m^2 do produto E. O somatório desses valores em horas deve ser igual ou menor a $0,1959$ horas, que é a capacidade disponível em horas da fábrica para produzir 1m^2 de três produtos;
- b) restrições (2) até (10): representam respectivamente os valores do tempo de horas das etapas t_2 até t_{11} , para fabricar 1m^2 dos produtos: A, B, C, D e E, não ultrapassa o limite de $0,1959$ horas;
- c) restrições (11) até (15): representam que, de cada um dos produtos: A, B, C, D e E, somente pode ser fabricada uma quantidade máxima diária de 2 produtos com tubo multiuso e / ou 1 produto com tubo mecânico;
- d) restrição (16): representa que a soma da quantidade total de produtos a ser fabricada por dia é de 3 produtos. Essa restrição é válida para as alternativas 8, 10 e 11 (maximizar a lucratividade, maximizar o tempo de trabalho e minimizar o impacto ambiental, respectivamente). Para o cálculo da alternativa 9 (maximizar o volume de produção) não será considerada a restrição (16);
- e) restrição (17): os valores das variáveis A, B, C, D, E (que representam o mix de produção) somente admitem valores inteiros.

O segundo passo foi determinar com o uso da PLI, o máximo volume de produção em unidades de produtos, considerando 0,1959 horas disponíveis para a produção. Para obter a máxima produtividade, foram apenas alterados os valores iniciais da função objetivo, onde tem-se a Equação (9):

Função objetivo da alternativa 9:

$$\text{Maximizar } Z = A + B + C + D + E \quad (9)$$

Sujeito a: permanecem os mesmos valores utilizados na formulação anterior, restrições (1) até (16).

O terceiro passo foi determinar com o uso da PLIM, para maximizar o tempo de trabalho na linha de produção, considerando 0,1959 horas disponíveis para a produção. Foi utilizada a função objetivo com os valores das horas necessárias para elaborar 1m² de produto. Função objetivo ver Equação (10):

Função objetivo 3:

$$\text{Maximizar } Z = 0,2400A + 0,3344B + 0,3788C + 0,2412D + 0,3203E \quad (10)$$

Sujeito a: permanecem os mesmos valores utilizados na formulação anterior, restrições (1) até (17).

O resultado do cálculo da PLI, referente a máxima lucratividade, produtividade e tempo de trabalho, está demonstrado na seção dos resultados, que compõem as funções objetivo das alternativas 8, 9 e 10. A função objetivo da alternativa 11, para minimizar o impacto ambiental somente é possível descrever após a determinação dos valores de pontuação única gerados a partir do SimaPro®.

Após obtidos os resultados com o uso da PLI, todos os valores de lucratividade, volume de produção, tempo de trabalho e impacto ambiental foram normalizados para fins de comparação. Foi utilizada a Equação (11), onde o valor V genérico do vetor normalizado fica entre $0 < V < 1$ e conserva a proporcionalidade (GOMES; GOMES, 2019)

$$a_{ij} / \text{máx } a_{ij} \quad (11)$$

onde:

a_{ij} = é o valor do item a ser normalizado

máx a_{ij} = é o maior valor da respectiva série de dados

Uma vez que se obteve o resultado da otimização, foi elaborada a simulação do processo produtivo em um modelo computacional, com uso do software *Plant Simulation*, para validação da modelagem da PLI. Conforme a ABNT NBR ISO 14040 (2014) e a

ABNT NBR ISO 14044 (2014), essa etapa está associada com os resultados obtidos após a interpretação dos dados, consistindo nas aplicações diretas dos estudos da ACV, podendo ser utilizada em uma variada gama de aplicações.

3.3.3.1 Validação com o uso da simulação computacional

Para validar o modelo matemático utilizado para a PLI, foi elaborada a simulação com o uso do software *Tecnomatix Plant Simulation* versão 15. A validação está associada com os resultados obtidos após a interpretação dos dados, pode ser considerada uma das aplicações diretas dos estudos que abrangem a análise do ciclo de vida (ABNT NBR ISO 14040, 2014). Como exemplo, tem-se o estudo de um posto de trabalho do setor automotivo, onde chegou-se na conclusão que com a simulação é possível avaliar quase que em tempo real o rendimento dos operadores, o que possibilita que os gerentes consigam prever a necessidade de medidas corretivas (CATERINO *et al.*, 2020). Outro estudo fez a simulação de uma linha de produção de uma bucha, onde identificou a operação gargalo e validou a proposta de melhoria, antes de ser implantada na prática (BLAGA *et al.*, 2019).

3.3.4 Análise com uso da técnica AHP

Foram realizadas 3 análises, com o uso da técnica AHP, sendo:

- 1) as 7 alternativas (mix de produtos);
- 2) as 7 alternativas (mix de produtos) e mais as 4 alternativas da PLI;
- 3) todas as alternativas com a opinião de especialistas da indústria.

Os critérios que foram considerados para a avaliação da sustentabilidade nos processos de fabricação das carretas graneleiras foram ao todo 2, sendo eles: o ambiental e o econômico. Esses 2 critérios foram desmembrados em 6 subcritérios, o critério ambiental é desmembrado em: saúde humana, ecossistemas e recursos. O critério econômico é desmembrado em: lucratividade, tempo de trabalho e quantidade de produtos.

Em seguida foi elaborada a matriz de comparação dos subcritérios, que foram comparados entre si, de forma a avaliar a sua importância. Os subcritérios foram colocados nas linhas e colunas, formando uma matriz quadrada $n \times n$. Na comparação dos subcritérios

foram atribuídos os valores numéricos de comparação, com o uso da escala elaborada por Saaty em 1980, valores de 1 a 9 (ver Tabela 17).

Tabela 17 - Matriz de comparação na técnica AHP

Critérios	Ambiental			Econômico		
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (RS)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção
Saúde humana (Pt)	1	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9
Ecossistemas (Pt)	valor recíproco	1	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9
Recursos (Pt)	valor recíproco	valor recíproco	1	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9
Lucratividade (RS)	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	1	valor de 1 a 9	valor de 1 a 9
Tempo de trabalho (h)	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	1	valor de 1 a 9
Volume de Produção	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	valor recíproco	1

Fonte: elaborado pelo autor.

A primeira avaliação dos pesos na matriz, consiste em atribuir os pesos iguais para todos os subcritérios, onde o valor de escala na comparação entre um subcritério e outro recebeu peso 1 (mesma importância). Para elaboração da matriz foi utilizado o *software* Excel.

O próximo passo foi calcular a média geométrica de cada linha, e o somatório do valor das colunas. O terceiro passo foi calcular a frequência relativa de cada subcritério da linha. O quarto passo foi calcular a matriz multiplicada referente aos valores da soma e da frequência relativa dos subcritérios, onde o resultado é denominado de λ_{max} . Após, foi elaborado o quinto passo que é o cálculo do Índice de consistência (CI), Equação (12).

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (12)$$

Após obter o valor do CI, faz-se o cálculo da Razão de coerência (RC), demonstrado na Equação (13). Saaty descreve se o $RC < 0,10$ significa que os julgamentos são coerentes. O valor do Índice randômico (IR) é obtido da Tabela 18, onde o valor de n representa o número de subcritérios que estão sendo avaliados na matriz AHP e tem-se o valor de RI correspondente.

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

Tabela 18 - Valores recalculados de RI, segunda versão proposta por Saaty

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,58

Fonte: (MORAES; SANTALIESTRA, 2008, p. 8).

Caso o valor de RC seja superior a 0,10 é indicado que a matriz seja reelaborada, atribuindo-se novos valores de comparação aos critérios. Havendo coerência nos julgamentos dos valores da matriz, o próximo passo consiste em normalizar os atributos diretos, que são valores numéricos onde quanto maior é melhor, neste caso: a lucratividade, volume de produção e o tempo de trabalho. Os atributos indiretos são valores numéricos onde quanto maior é pior, faz-se primeiro a harmonização dos valores e depois a normalização, onde tem-se: o impacto na saúde humana, ecossistemas, escassez de recursos. A lógica da harmonização é fazer com que o maior valor receba o menor peso para após aplicar a normalização.

Após foi realizada a multiplicação dos valores dos critérios pelas alternativas, encontrando-se a melhor alternativa. Também foi realizada a análise de sensibilidade, que está descrita no subcapítulo a seguir.

3.3.4.1 Análise de sensibilidade

“Em qualquer modelo de decisão é importante examinar quanto sensível é a alternativa escolhida se as variáveis envolvidas no modelo de decisão forem alteradas” (MORAES; SANTALIESTRA, 2008, p. 13). Assim, o tomador de decisão identifica possíveis caminhos em situações que não haviam sido previstas.

Na análise de sensibilidade foi realizada a comparação alternando os valores % do critério de lucratividade, para ver o quanto esse deveria crescer em % para haver uma alteração na preferência de uma alternativa com o menor impacto ambiental.

3.3.5 Análise com uso da técnica DEA

Foram realizadas 2 análises para tomada de decisão com o uso da técnica DEA, sendo:

- 1) as 7 alternativas (mix de produtos);
- 2) as 7 alternativas (mix de produtos) e mais as alternativas da PLI:

As Unidades de tomada de decisão (DMU) foram consideradas as alternativas do mix de produtos. A DEA utiliza a técnica de programação linear para medir a eficiência

das DMUs de modo que os vetores de entrada-saída observados sejam envolvidos de forma consistente (LEE; LEE; KIM, 2009).

Foram estabelecidos como dados de entrada (*inputs*): tempo de trabalho. Os dados de saída (*outputs*): impacto ambiental, lucratividade e quantidade de produtos. Os três critérios de *endpoints* foram somados: saúde humana, ecossistemas e escassez de recursos. O impacto ambiental foi harmonizado e logo após normalizado, pois como é considerado um critério de saída, a DEA tende a maximizar o resultado. Desta forma, quanto maior melhor, pois a normalização consiste em atribuir o maior peso para a alternativa que gera o menor impacto ambiental. A representação de ordenação da DMU, *inputs* e *outputs* está representada na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados de *inputs* e *outputs*

DMU Alternativas do mix de produtos	Inputs		Outputs	
	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)	Lucratividade (R\$)	Impacto ambiental (Pt)
	Valores em horas por m ² do mix de produtos	Quantidade total de produtos no mix	Lucratividade por m ² do mix de produtos	Saúde Humana + Ecossistemas + Escassez de Recursos

Fonte: elaborado pelo autor.

Foi utilizado o Modelo CRS (*constant returns to scale*), que é utilizado para *benchmarks* internos, avaliações objetivas da eficiência global, que apresenta valores de eficiência e ineficiência atribuídos a cada uma das DMU's. Foi utilizada a orientação de *Input* – Tipo: CRS.

O software utilizado para o cálculo da DEA está disponível no site <http://www.sagepe.com.br/>, sistema para análise e gestão da produtividade e eficiência. Ainda é possível mencionar os motivos da escolha da técnica DEA: reflete múltiplos aspectos de uma empresa, não requer pesos de prioridades ou medidas, utiliza múltiplas entradas e saídas, aplicado a qualquer empresa e número de alternativas de decisão, não requer nenhuma forma de função e permite a comparação com o melhor desempenho (SINGH *et al.*, 2014).

Ao final foi elaborada uma comparação entre as técnicas AHP e DEA sob o ponto de vista das implicações gerenciais na indústria de implementos agrícolas para a tomada de decisão, elencando aspectos que foram observados na definição da melhor alternativa para a seleção do mix de produção.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

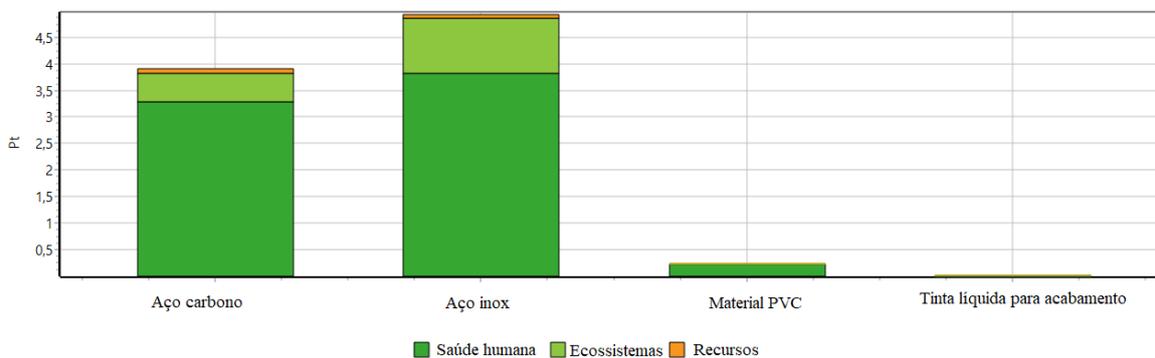
Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões sobre as avaliações do impacto ambiental, o modelo de otimização e análise para tomada de decisão com o uso das técnicas AHP e DEA. Os resultados estão descritos na mesma sequência dos procedimentos metodológicos, para facilitar o entendimento do estudo.

4.1 Avaliação do impacto ambiental por matéria-prima

Os resultados gerados pelo software SimaPro®, considerando 1m² dos 4 materiais por produto: aço carbono, aço inox, material PVC e tinta líquida para acabamento, estão demonstrados na Figura 27, que apresenta o impacto ambiental global com pontuação única, com o desmembrando em 3 categorias de impacto, que são: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais. A análise do impacto ambiental é expressa em unidade de eco-indicadores, que são os valores padrão dos indicadores ecológicos. Assim, utiliza-se geralmente a unidade mPt (mili-ponto), onde 1000 mPt = 1 Pt. Os valores são demonstrados em forma de pontuação única (fator de ponderação), onde o objetivo principal é comparar as diferenças relativas entre produtos ou componentes. A escala no valor de 1Pt é representativa de um milionésimo da carga ambiental anual de um habitante europeu (E99, 2000).

Considerando a quantidade de materiais utilizados em 1m² dos produtos, o aço inox traz um maior impacto global, seguido pelo aço carbono (Figura 27). O impacto ambiental do aço inox (4,93Pt) é 26,4% maior que o impacto do aço carbono (3,9Pt). Referente a saúde humana e ecossistemas o aço inox tem um maior impacto, porém, quanto à escassez de recursos o aço carbono tem maior impacto em comparação ao aço inox, sendo 10,3% superior ao aço inox, que é o segundo material com maior impacto nessa categoria.

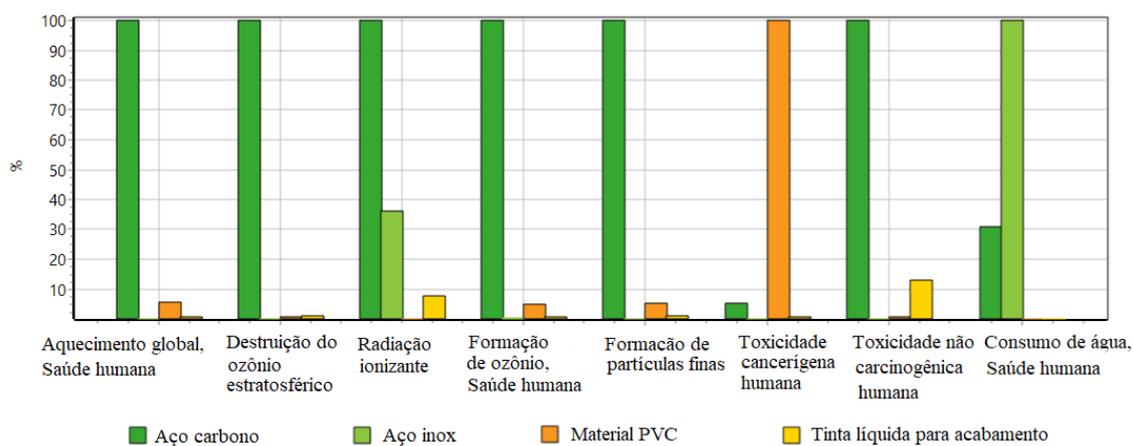
Figura 27 - Impactos ambientais dos materiais por pontuação única gerados por m² de produto



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

Conforme a Figura 27, percebe-se que o aço inox traz um maior impacto global. Na saúde humana e ecossistemas o aço inox traz um maior impacto. Quanto aos recursos naturais a tinta líquida tem maior impacto em comparação aos demais. Para identificar onde os materiais estão tendo maior ou menor impacto, seguem as Figuras 28, 29 e 30 que demonstram as 22 categorias de impacto *midpoint*, desmembradas respectivamente em 3 categorias: saúde humana, ecossistemas e recursos.

Figura 28 – Impacto na Saúde humana (materiais por m² de produto)



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

Percebe-se que o material PVC não ocasiona impacto na radiação ionizante, porém esse é superior aos demais na toxicidade cancerígena humana, por possuir substâncias como o cloro e etileno, que dão origem à subprodutos denominados de organoclorados perigosos. Neste caso, a substância que aparece em maior quantidade é o poluente organoclorado, descrito por *2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina* (1,94⁻⁷mPt). Tem-se “[...] emissões de cloro, etileno, [...] e subprodutos clorados, incluindo dioxinas,

para o ambiente de trabalho ou o ambiente exterior (ar e água). Vários destes produtos químicos são substâncias tóxicas bem conhecidas [...]” (COM, 2000, p. 5).

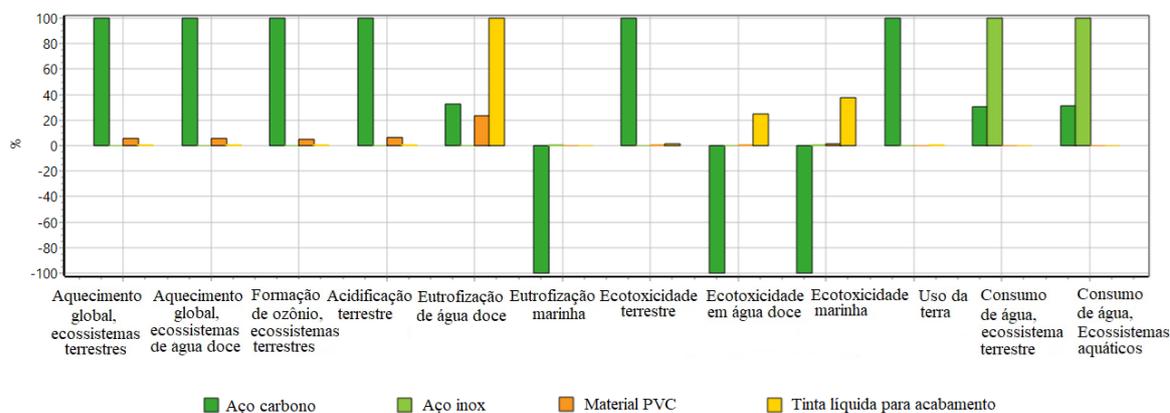
O aço inox tem maior impacto no consumo de água referente ao uso de água de rios ($1,33^{-4}$ Pt) e de poços ($6,13^{-7}$ Pt) e para uso em turbinas ($1,51^{-4}$ Pt).

Todos os demais impactos na saúde humana, em maior quantidade estão relacionados ao aço carbono em 6 categorias, sendo: aquecimento global, destruição do ozônio estratosférico, radiação ionizante, formação do ozônio, formação de partículas finas e toxicidade não carcinogênica humana. Os elementos que constam em maior quantidade em cada uma das categorias, para o aço carbono, seguem:

- 1) Aquecimento global: dióxido de carbono ($9,09^{-5}$ Pt) e metano ($6,57^{-6}$ Pt);
- 2) Destruição do ozônio estratosférico: Monóxido de dinitrogênio ($9,36^{-9}$ Pt);
- 3) Radiação ionizante: Carbono-14 ($1,85^{-9}$ Pt), Césio-137 ($4,84^{-10}$ Pt) e Radônio-222 ($9,71^{-10}$ Pt). Para o aço inox, que aparece em segundo lugar, o maior impacto é na substância Radônio-222 ($1,11^{-9}$ Pt);
- 4) Formação do ozônio: substâncias liberadas no ar, Óxidos de nitrogênio ($1,81^{-7}$ Pt);
- 5) Formação de partículas finas: substâncias liberadas no ar, Dióxido de enxofre ($0,00105$ mPt), Partículas $< 2,5 \mu\text{m}$ ($1,11^{-4}$ Pt) e Óxidos de nitrogênio ($1,38^{-5}$ Pt);
- 6) Toxicidade não carcinogênica humana: substância liberada no ar, Zinco ($1,29^{-6}$ Pt).

A Figura 29 apresenta o impacto nos ecossistemas, considerando o total de materiais. O aço inox apresenta maiores impactos no consumo de água dos ecossistemas terrestre e aquático e na eutrofização marinha. Os elementos que constam em maior quantidade são: o uso de água dos rios em turbinas e a amônia.

Figura 29 – Impacto nos Ecossistemas (materiais por m^2 de produto)



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

O aço inox apresenta maiores impactos no consumo de água dos ecossistemas terrestre e aquático e na Eutrofização marinha. Referente ao consumo de água nos ecossistemas terrestres consta em maior quantidade o uso de água em turbinas ($9,2^{-7}\text{Pt}$) e dos rios ($8,1^{-7}\text{Pt}$). No ecossistema aquático também consta em maior quantidade o uso de água em turbinas ($4,09^{-11}\text{Pt}$). Na Eutrofização marinha o elemento que consta em maior quantidade é a Amônia ($2,52^{-13}\text{Pt}$).

A tinta líquida apresenta maior impacto na eutrofização de água doce, onde consta em maior quantidade a substância Fosfato ($9,12^{-11}\text{Pt}$). Na ecotoxicidade em água doce, consta em maior quantidade o Zinco ($4,72^{-12}\text{Pt}$) e o Bisfenol A ($4,48^{-12}\text{Pt}$). Na ecotoxicidade marinha o elemento em maior quantidade é o Zinco ($1,02^{-12}\text{Pt}$).

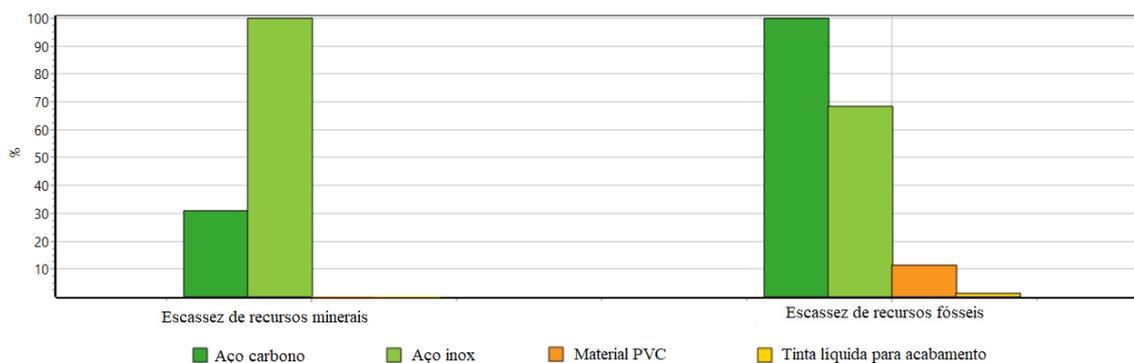
Referente ao uso do aço carbono, apresenta os maiores impactos nos ecossistemas em 6 categorias, que seguem:

- 1) Aquecimento global, ecossistemas terrestres: Dióxido de carbono ($2,75^{-7}\text{Pt}$);
- 2) Aquecimento global, ecossistemas de água doce: Dióxido de carbono ($7,51^{-12}\text{Pt}$);
- 3) Formação de ozônio, ecossistemas terrestres: Óxidos de nitrogênio ($2,57^{-8}\text{Pt}$);
- 4) Acidificação terrestre: Dióxido de enxofre ($4,8^{-8}\text{Pt}$);
- 5) Ecotoxicidade terrestre: Zinco ($1,07^{-9}\text{Pt}$);
- 6) Uso da terra: ocupação de terra arável ($1,05^{-8}\text{Pt}$) e ocupação de florestas ($0,07^{-7}\text{Pt}$).

Percebe-se que há valores negativos na Figura 38, que corresponde ao impacto do aço carbono, na ecotoxicidade da água doce na substância Zinco ($-5,58^{-11}\text{Pt}$) e Cobre ($-1,82^{-11}\text{Pt}$), na ecotoxicidade marinha tem-se o Zinco ($-3,54^{-15}\text{Pt}$) e na eutrofização marinha o Dióxido de nitrogênio ($-4,41^{-18}\text{Pt}$).

A Figura 30 demonstra o impacto na escassez de recursos minerais, o aço inox gera o maior impacto. As maiores quantidades de elementos são: o Magnésio ($0,836\text{mPt}$), o Níquel ($1,13\%$ em sulfetos, $0,76\%$ em minério bruto, $0,451\text{mPt}$) e o Silício ($0,499\text{mPt}$). E o aço carbono consta em segundo lugar neste impacto, onde o elemento com maior quantidade é o Molibdênio ($0,29\text{mPt}$).

Figura 30 – Impacto na Escassez de Recursos (materiais por m² de produto).



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

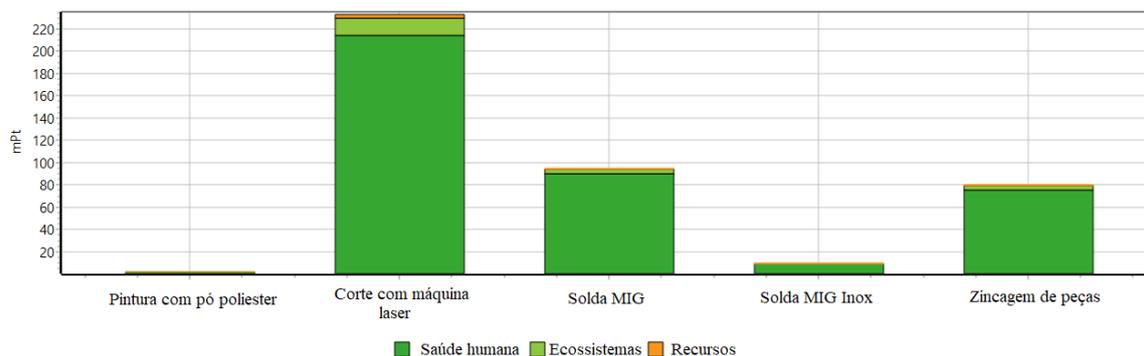
Quanto à escassez de recursos fósseis, o aço carbono e o aço inox apresentam os maiores impactos no uso dos mesmos recursos. Esses recursos são utilizados para a geração de energia. Tem-se as seguintes quantidades, para o aço carbono e inox, respectivamente: carvão (0,952mPt e 0,995mPt), petróleo (4,25mPt e 1,80mPt) e gás natural (1,49mPt e 1,77mPt). A indústria siderúrgica é responsável por quase 9% da utilização de energia antrópica no mundo, torna-se urgente reduzir a utilização total de energia devido as enormes pressões na redução do consumo de energia e emissão de Dióxido de carbono (WANG *et al.*, 2013).

Como solução, é importante realizar o ajuste da capacidade dos dispositivos na indústria siderúrgica, para reduzir o excedente de gás. Isso pode melhorar a eficiência energética do processo de produção de aço, o que pode reduzir indiretamente o consumo de energia (WANG *et al.*, 2013).

4.2 Avaliação do impacto ambiental por processo

A comparação entre os processos para fabricação de 1m² de produto estão representados na Figura 31. Percebe-se que o maior impacto ambiental é gerado pelo processo de corte laser (233mPt). Na indústria o aço inox utiliza um maior número de horas no processo de corte com máquina laser, que possui impacto ambiental muito superior aos demais processos, considerando as medidas unitárias.

Figura 31 - Impactos ambientais dos processos de fabricação por pontuação única gerados por m² de produto

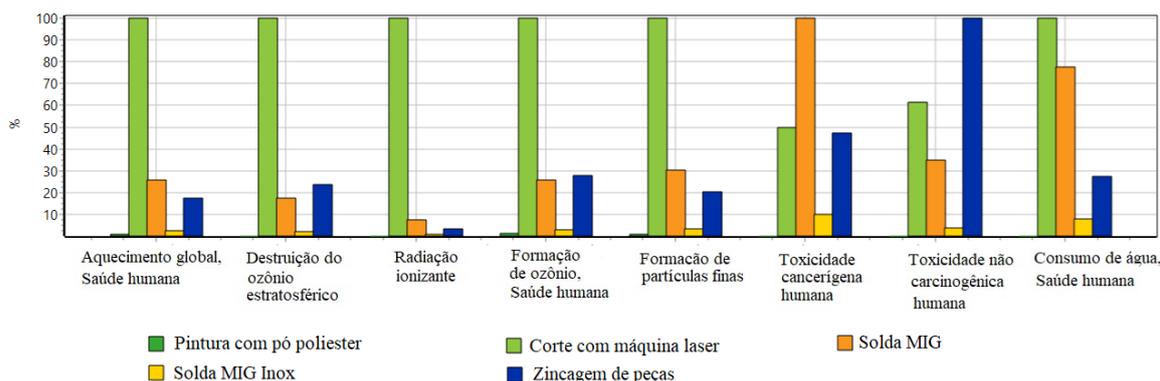


Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

O motivo do produto em chapa inox causar maior impacto ambiental, deve-se ao fato do uso da chapa inox e conseqüentemente o corte laser empregar um tempo maior de corte no material inox em relação ao aço carbono.

Observa-se que o corte com máquina laser é 146,8% superior ao segundo processo com maior impacto que é a soldagem MIG (94,4mPt) (ver Figura 31). Para melhorar a visualização da abrangência dos impactos ambientais, foram elencadas as 22 categorias de impacto *midpoint*, desmembradas em 3 categorias: saúde humana, ecossistemas e recursos (ver Figuras 32, 33 e 34).

Figura 32 - Impacto na Saúde humana (processos de fabricação por m² de produto)



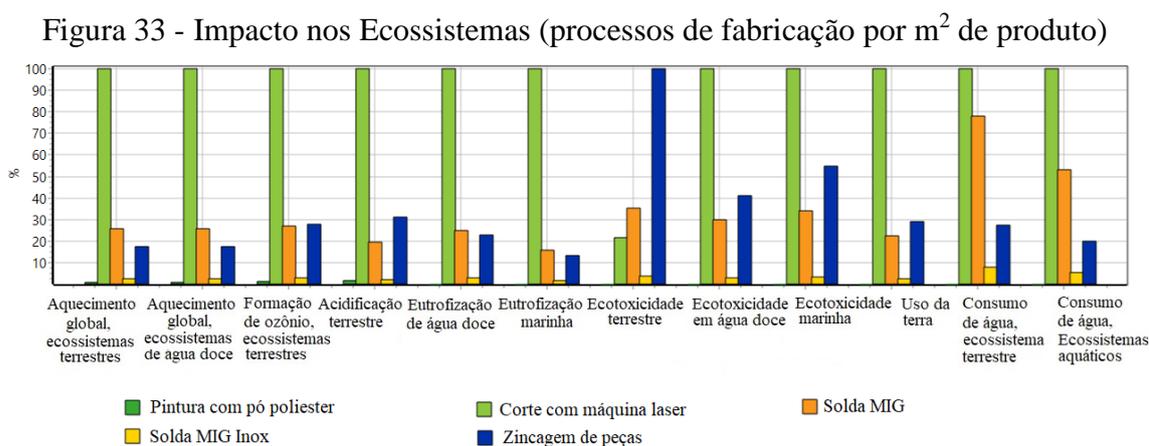
Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

Referente ao impacto na saúde humana (Figura 32) percebe-se que o corte com máquina laser impacta em 6 categorias, que estão listadas a seguir juntamente com o elemento que consta em maior quantidade relacionado a esse processo e categoria de impacto, sendo:

- 1) Aquecimento global: Dióxido de carbono ($4,72^{-6}\text{Pt}$);
- 2) Destruição do ozônio: Monóxido de dinitrogênio ($1,16^{-9}\text{Pt}$);
- 3) Radiação ionizante: Radônio-222 ($7,71^{-9}\text{Pt}$);
- 4) Formação de ozônio: Óxidos de nitrogênio ($1,13^{-8}\text{Pt}$);
- 5) Formação de partículas finas: Dióxido de enxofre ($2,95^{-6}\text{Pt}$);
- 6) Consumo de água: uso de água em turbinas ($3,04^{-6}\text{Pt}$).

O processo de zincagem de peças causa maior impacto na categoria Toxicidade não carcinogênica, com maior quantidade no elemento Bário ($1,82^{-9}\text{Pt}$). O processo de solda MIG causa maior impacto na categoria Toxicidade cancerígena, com maior quantidade no elemento Crômio ($7,16^{-8}\text{Pt}$).

A Figura 33, apresenta as 12 categorias de impacto referente aos ecossistemas. Observa-se que em 11 categorias o processo de corte laser tem maior impacto e em 1 categoria a zincagem de peças apresenta maior impacto.



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

No impacto do ecossistema (Figura 33), o corte com máquina laser impacta em 11 categorias, que estão listadas a seguir juntamente com o elemento que consta em maior quantidade relacionado a esse processo, sendo:

- 1) Aquecimento global, ecossistemas terrestres: Dióxido de carbono ($1,42^{-8}\text{Pt}$);
- 2) Aquecimento global, ecossistemas de água doce: Dióxido de carbono ($3,90^{-13}\text{Pt}$);
- 3) Formação de ozônio, ecossistemas terrestres: Óxidos de nitrogênio ($1,60^{-9}\text{Pt}$);
- 4) Acidificação terrestre: Dióxido de enxofre ($3,43^{-9}\text{Pt}$);
- 5) Eutrofização de água doce: Fosfato ($2,48^{-9}\text{Pt}$);
- 6) Eutrofização marinha: Nitrato ($4,05^{-13}\text{Pt}$);

7) Ecotoxicidade em água doce: Cobre ($1,29^{-10}\text{Pt}$) e Zinco ($8,61^{-11}\text{Pt}$) ambos no processo de corte laser. No processo de zincagem de peças o elemento Zinco ($1,06^{-10}\text{Pt}$) consta em maior quantidade;

8) Ecotoxicidade marinha: Cobre ($2,34^{-11}\text{Pt}$) e Zinco ($1,86^{-11}\text{Pt}$) ambos no processo de corte laser. No processo de zincagem de peças com elemento Zinco ($2,29^{-11}\text{Pt}$), consta em maior quantidade;

9) Uso da terra: ocupação intensiva de floresta ($4,87^{-10}\text{Pt}$);

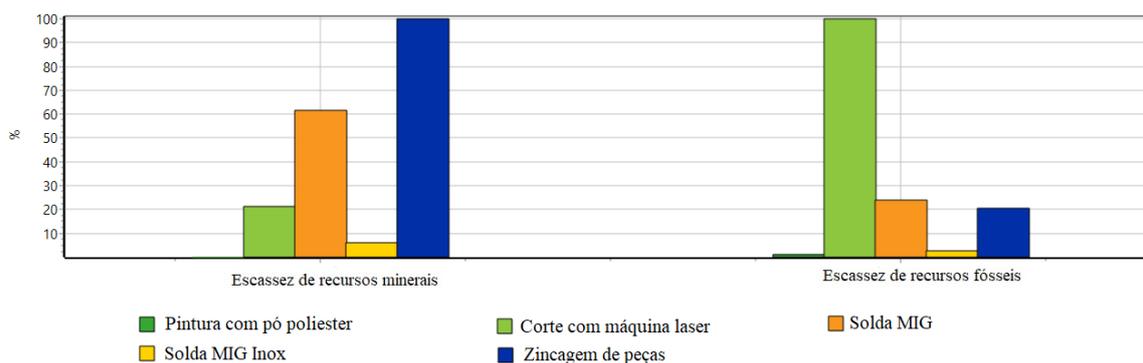
10) Consumo de água, ecossistemas terrestres: uso de turbina, RoW ($1,44^{-7}\text{Pt}$). Em segundo lugar nessa categoria de impacto consta o processo de solda MIG, que utiliza o mesmo elemento uso de turbina, RoW ($7,67^{-8}\text{Pt}$);

11) Consumo de água, ecossistemas aquáticos: uso de turbinas ($4,80^{-11}\text{Pt}$).

O processo de zincagem de peças causa maior impacto na Ecotoxicidade terrestre onde o Zinco ($9,16^{-10}\text{Pt}$) é o elemento utilizado em maior quantidade.

No impacto referente a escassez de recursos (Figura 34), a zincagem de peças ocasiona maior impacto na escassez de recursos minerais com uso em maior quantidade do elemento Chumbo ($7,84^{-3}\text{Pt}$). Nessa categoria, o equipamento laser consta como o que causa maior impacto no consumo do elemento Ferro ($4,76^{-3}\text{Pt}$). O corte com máquina laser impacta mais na escassez de recursos fósseis, nos elementos: gás natural ($0,139\text{Pt}$), carvão ($0,059\text{Pt}$) e petróleo ($0,058\text{Pt}$).

Figura 34 - Impacto na Escassez de Recursos para o total de processos

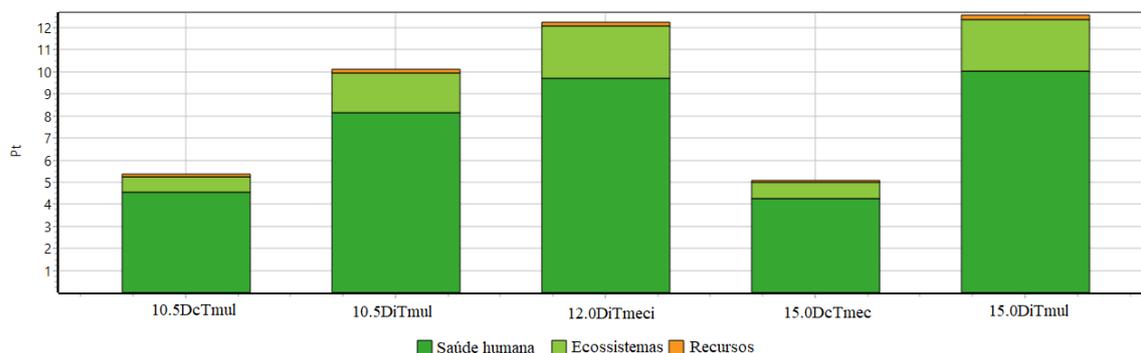


Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

4.3 Avaliação do impacto ambiental por produto

O resultado da comparação, considerando os materiais utilizados nos cinco produtos, está representado na Figura 35.

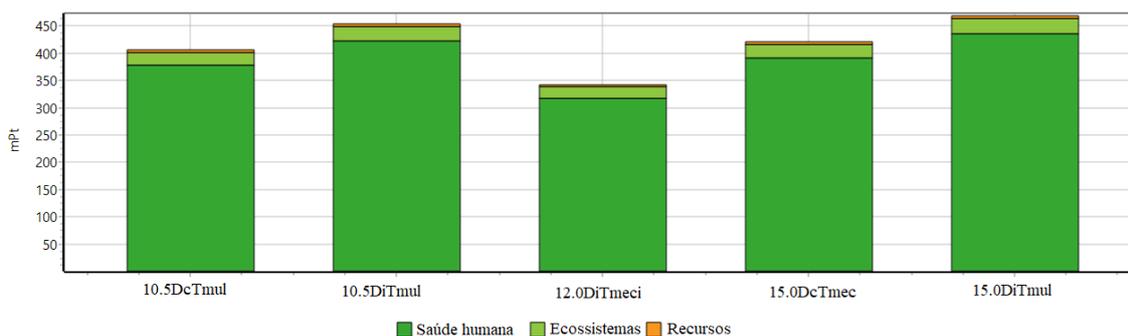
Figura 35 - Impactos ambientais gerados por m² de produto considerando os materiais



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

O resultado da comparação, considerando os processos utilizados nos produtos estão demonstrados na Figura 36.

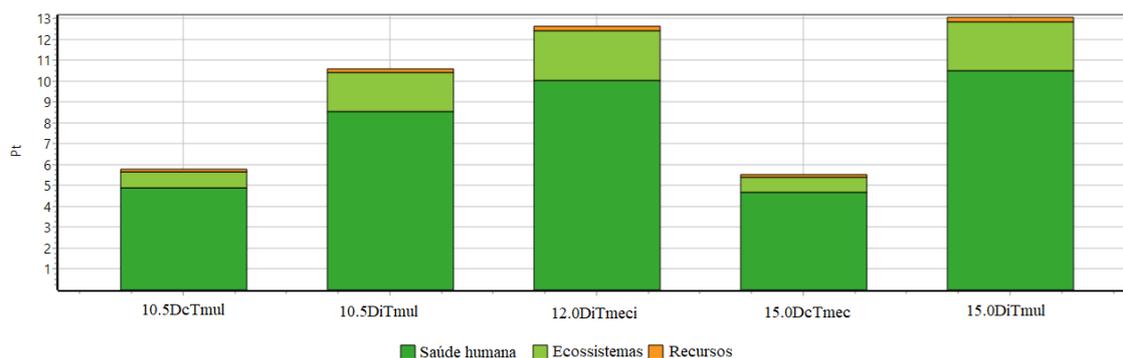
Figura 36 - Impactos ambientais gerados por m² de produto considerando os processos



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

Considerando os materiais, os produtos com depósito em aço inox causam um impacto ambiental maior em relação aos produtos com depósito em aço carbono (10.5DiTmul - 10,1Pt, 12.0DiTmec - 12,3Pt e 15.0DiTmul - 12,6Pt) (ver Figura 35). Comparando os processos de fabricação, o maior impacto ambiental é gerado pelos produtos com depósito em aço inox e que utilizam tubo multiuso (10.5DiTmul - 454mPt, e 15.0DiTmul - 469mPt). Esses produtos apresentam tempos mais elevados de corte laser, maior quantidade de solda MIG e de zincagem de peças (ver Figura 36). O impacto ambiental gerado pelos materiais é superior ao impacto gerado pelos processos, como exemplo, o produto 10.5DcTmul o impacto ambiental do material é de 5,35Pt e do processo é de 0,406Pt (406mPt), representado nas Figuras 35 e 36 respectivamente.

A Figura 37 apresenta o resultado do impacto ambiental global com pontuação única, somando os materiais e processos.

Figura 37 - Impactos ambientais gerados por m² de produto (materiais + processos)

Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

Para elaborar a função objetivo da alternativa 11, que abrange minimizar o impacto ambiental, foi associado a cada modelo de produto (A, B, C, D e E) o valor de pontuação única referente ao impacto ambiental (Pt) para fabricar 1m² de cada produto, onde tem-se a Equação (12):

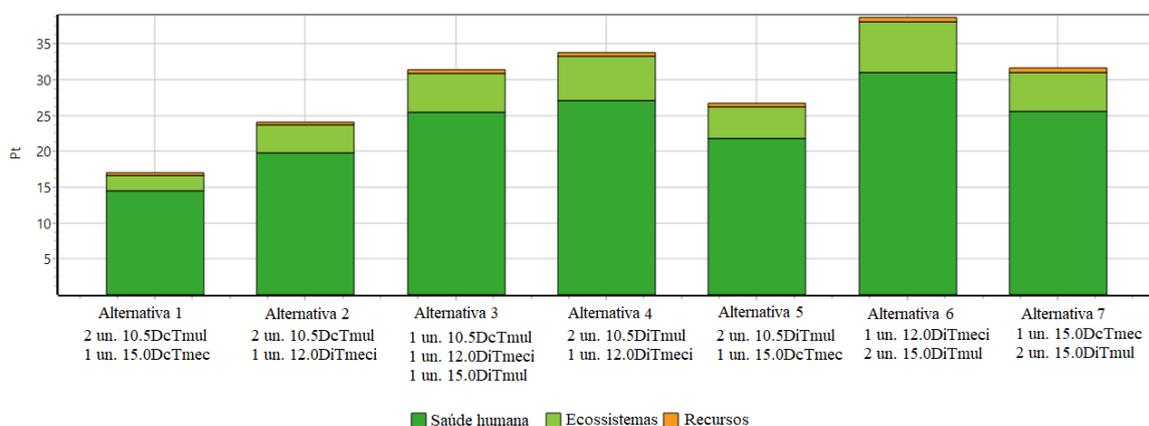
Função objetivo alternativa 11:

$$\text{Minimizar } Z = 5,76A + 10,6B + 12,6C + 5,51D + 13E \quad (12)$$

4.4 Avaliação do impacto ambiental por mix de produtos

Considerando a demanda do mix de produtos, a Figura 38 apresenta o impacto ambiental global com base na demanda do mix. O mix de produtos é composto por uma demanda atual de 3 implementos por dia, sendo 2 implementos com tubo multiuso e 1 implemento com tubo mecânico.

Figura 38 - Impactos ambientais gerados pelo mix de produtos considerando materiais e processos



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

A Alternativa 1 representa o mix de produtos onde se obteve o menor impacto ambiental (17Pt – 2 un. 10.5DcTmul e 1 un. 15.0DcTmec). Esses produtos têm em comum a característica do depósito do produto ser em aço carbono. Já a Alternativa 6 representa o mix de produtos onde ambos os modelos de implementos possuem o depósito em aço inox, gera um maior impacto ambiental (38,7Pt – 1 un. 12.0DiTmeci e 2 un. 15.0DiTmul).

As 22 categorias de impacto (*midpoints*) associados aos materiais utilizados nos produtos e o processo de produção para fabricar os produtos estão na Tabela 20.

Tabela 20 - Visão dos maiores impactos dos materiais e processos de fabricação

	Categorias de Impacto (Midpoints)	Materiais utilizados nos produtos				Elemento ou substância que gera o maior impacto	Processo de produção para fabricar os produtos					Elemento ou substância que gera o maior impacto
		Aço carbono (2073,6843kg)	Aço inox (494,9754kg)	PVC (41,9706kg)	Tinta líquida (2,3951kg)		Pintura com pó poliéster (12,92m ²)	Corte com máquina laser (2,55h)	Solda MIG (201,5m)	Solda MIG Inox (13,93m)	Zanagem de peças (4,63m ²)	
Saúde humana	Aquecimento global, Saúde humana	X				Dióxido de carbono		X				Dióxido de carbono
	Destruição do ozônio estratosférico	X				Monóxido de dinitrogênio		X				Monóxido de dinitrogênio
	Radiação ionizante	X				Carbono-14, Radônio-222, Césio-137		X				Radônio-222
	Formação de ozônio, Saúde humana	X				Óxidos de nitrogênio		X				Óxidos de nitrogênio
	Formação de partículas finas	X				Partículas < 2,5 µm		X				Dióxido de enxofre
	Toxicidade cancerígena humana			X		2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina			X			Crômio
	Toxicidade não carcinogênica humana	X				Zinco					X	Bário
Consumo de água, Saúde humana		X			uso de água em turbinas		X				uso de água em turbinas	
Ecossistemas	Aquecimento global, ecossistemas terrestres	X				Dióxido de carbono		X				Dióxido de carbono
	Aquecimento global, ecossistemas de água doce	X				Dióxido de carbono		X				Dióxido de carbono
	Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	X				Óxidos de nitrogênio		X				Óxidos de nitrogênio
	Acidificação terrestre	X				Dióxido de enxofre		X				Dióxido de enxofre
	Eutrofização de água doce				X	Fosfato		X				Fosfato
	Eutrofização marinha		X			Amônia		X				Nitrato
	Ecotoxicidade terrestre	X				Zinco					X	Zinco
	Ecotoxicidade em água doce				X	Zinco, Bisfenol A		X				Cobre
	Ecotoxicidade marinha				X	Zinco		X				Cobre
	Uso da terra	X				Ocupação de terra arável, ocupação de florestas		X				Ocupação intensiva de floresta
	Consumo de água, ecossistema terrestre		X			uso de água em turbinas		X				uso de turbina, RoW
	Consumo de água, Ecossistemas aquáticos		X			uso de água em turbinas		X				uso de água em turbinas
Escassez de Recursos	Escassez de recursos minerais		X			Magnésio					X	Chumbo
	Escassez de recursos fósseis	X				Petróleo, Gás natural, Carvão		X				Gás natural, Carvão, Petróleo
Total		13	5	1	3		0	18	1	0	3	
Maior impacto total (ranking)		2°	1°	3°	4°		5°	1°	3°	4°	2°	

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 20, em cada categoria de impacto está assinalado o material e processo que ocasiona o maior impacto ambiental. Ao lado de cada material ou processo consta o

elemento ou substância que gera o maior impacto ambiental. Na parte inferior consta o total de vezes em que o material ou processo gerou o maior impacto na categoria e por último o *ranking* de posição total referente a maior pontuação em eco-indicadores.

Observa-se que o material aço carbono é superior no impacto ambiental em 13 categorias, e o aço inox em 5 categorias. Porém o aço inox é o 1º no *ranking* em gerar o maior impacto ambiental e o aço carbono é o 2º colocado. Neste sentido, é percebida a importância desses dois materiais tanto em sua utilização nos produtos (em média 93,1%), quanto no impacto ambiental, ocupando a 1º e 2º colocação e sendo juntos os materiais que mais impactam em 18 categorias.

Quanto aos processos de fabricação, o corte laser, é o processo que mais impacta no ambiente de 18 categorias, sendo o 1º no *ranking* em gerar o maior impacto ambiental. No processo de fabricação corresponde em média a 56,2% do tempo dos processos de corte utilizados para a fabricação dos produtos.

Referente aos elementos e substâncias identificados com maior frequência, tem-se:

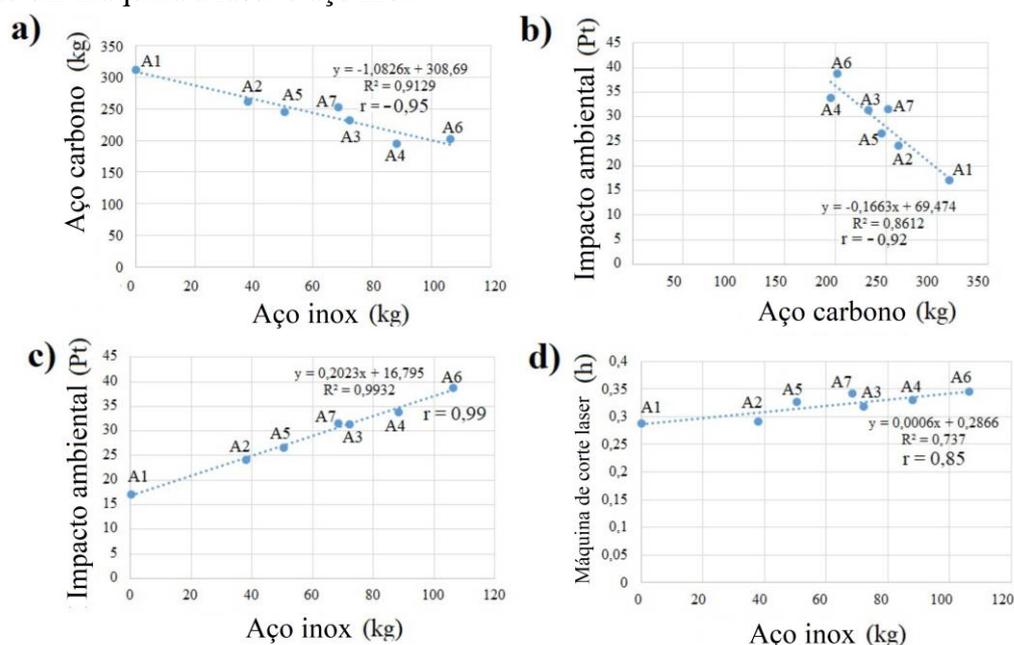
- a) Dióxido de carbono: encontrado 6 vezes em maior quantidade, contribuindo para o aquecimento global (saúde humana), aquecimento global ecossistemas terrestres e de água doce. Esse elemento se repetiu nas mesmas categorias tanto nos materiais quanto nos processos. Considera-se que a produção de aços e o corte de materiais (aço carbono e corte laser) contribuem para o aquecimento global, precisam de energia elétrica em seu processo produtivo. O Dióxido de carbono é liberado durante a produção de energia elétrica afetando o aquecimento global (SHANBAG; MANJARE, 2020);
- b) Uso de água em turbinas: encontrado 6 vezes em maior quantidade, contribuindo para o consumo de água (saúde humana) e consumo de água no ecossistema terrestre e aquáticos. Esse elemento se repetiu nas mesmas categorias tanto nos materiais quanto nos processos. O uso de água em turbinas é devido a geração de energia para a produção dos materiais e para o processo de corte (encontrado em maior quantidade para o aço inox e corte laser). Um estudo identificou que para a produção de pneus, a geração de energia é o que aumenta os problemas de poluição, de forma superior aos processos utilizados na produção (SHANBAG; MANJARE, 2020);
- c) O Zinco foi o elemento encontrado 5 vezes em maior quantidade, contribuindo para toxicidade não carcinogênica humana (saúde humana), na ecotoxicidade terrestre, em água doce e marinha (ecossistemas);

d) O Petróleo, gás natural e carvão: constam na escassez de recursos fósseis, tanto para materiais como processos. O carvão é consumido para a produção de eletricidade, o que leva ao esgotamento das fontes de energia (SHANBAG; MANJARE, 2020);

e) Partículas < 2,5 µm e o Dióxido de enxofre: constam na categoria de formação de partículas finas (saúde humana). Há vários estudos publicados sobre os efeitos na saúde humana devido as partículas finas, dentre eles os efeitos respiratórios (SHANBAG; MANJARE, 2020). O Dióxido de enxofre também impacta na acidificação terrestre, juntamente com Óxidos de nitrogênio que afetam a formação do ozônio. “O aumento da acidez na água da chuva ocorre em decorrência principal do aumento na concentração de óxidos de enxofre e nitrogênio na atmosfera”, sendo o Dióxido de enxofre o principal responsável (SILVA *et al.*, 2013, p. 3).

O menor impacto ambiental é gerado pelo mix de produtos da Alternativa 1. O maior impacto ambiental é gerado pelo mix de produtos da Alternativa 6. A Figura 39 ilustra a correlação entre o uso dos materiais em cada uma das alternativas, considerando a chapa carbono (kg) e chapa inox (kg), as horas de corte laser e o indicador de impacto ambiental de pontuação única (Pt).

Figura 39 - Coeficiente de correlação linear de Pearson (r): a) correlação linear entre aço inox e aço carbono, b) correlação linear entre aço carbono e impacto ambiental, c) correlação linear entre aço inox e impacto ambiental, d) correlação linear entre horas de corte em máquina a laser e aço inox



A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 = Alternativas do mix de produção

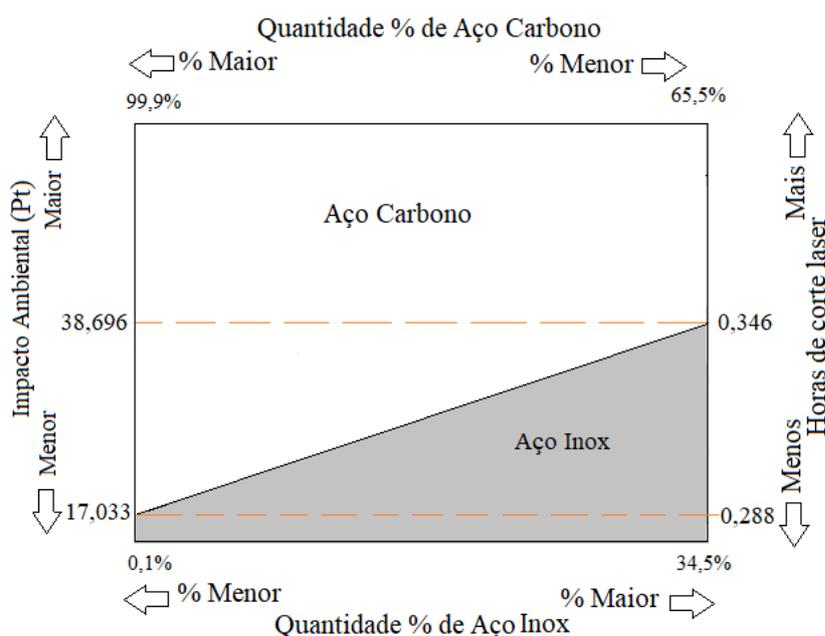
Fonte: elaborado pelo autor.

O coeficiente de variação pode variar de -1 a 1, isso significa que uma correlação linear positiva forte, o r está próximo de 1, enquanto que em uma correlação negativa forte, o r está próximo de -1 (LARSON; FABER, 2015). Para cada uma das alternativas o material em PVC tem a mesma quantidade (em cada mix de produtos há 2 tubos de descarga multiuso). Assim, o impacto ambiental para todas as alternativas em relação a esse material é o mesmo.

Existe uma forte correlação linear negativa entre a utilização dos materiais: aço carbono e aço inoxidável ($r = -0,95$). Quanto maior a quantidade de aço carbono nos produtos, menor é o impacto ambiental ($r = -0,92$), também, menor é a quantidade de aço inoxidável. Existe uma forte correlação linear positiva entre o aço inoxidável e o impacto ambiental ($r = 0,99$). Quanto maior a quantidade de aço inoxidável, maior o impacto ambiental, ocorre uma menor utilização do material de aço carbono.

Em relação ao corte laser, também há forte correlação com o uso do aço inoxidável ($r = 0,85$). O tempo de corte laser é maior para o mix de produtos que utiliza mais material de aço inoxidável, gerando um maior impacto ambiental. O inverso também pode ser considerado, quanto maior o uso do aço carbono, menor é o tempo de corte laser necessário, resultando em menor impacto ambiental. A Figura 40, ilustra o comportamento do impacto ambiental em relação ao material utilizado e as horas de corte laser.

Figura 40 - Relação entre impacto ambiental x material x processo



Fonte: elaborado pelo autor.

Na medida em que aumenta o uso do aço carbono, ocorre redução nas horas de processo de corte laser, e tem-se um menor impacto ambiental. Os valores indicados na Figura 40, correspondem ao mix de produtos que foi utilizado e avaliado no estudo. Percebe-se que utilizando um mix de produtos composto por 99,9% de aço carbono e 0,1% de aço inox, serão necessárias 0,288 horas de corte laser, resultando em um impacto ambiental de 17,033 Pt. Para a máxima utilização de aço inox no mix de produtos, que é 34,5%, necessita de 0,346 horas de corte laser, e vai resultar em um impacto ambiental de 38,696 Pt.

4.4 Os cenários com o uso da programação linear inteira

Obteve-se como resultado a fabricação de 3 produtos por dia (1 produto 12.0DiTmec e 2 produtos 15.0DiTmul) para maximizar a lucratividade e maximizar o tempo de trabalho. Para maximizar o volume de produção, obteve-se 4 produtos (2 produtos 10.5DcTmul, 1 produto 15.0DcTmec e 1 produto 15.0DiTmul). Para a função objetivo de minimizar o impacto ambiental o resultado é de 3 produtos (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), ver Tabela 21.

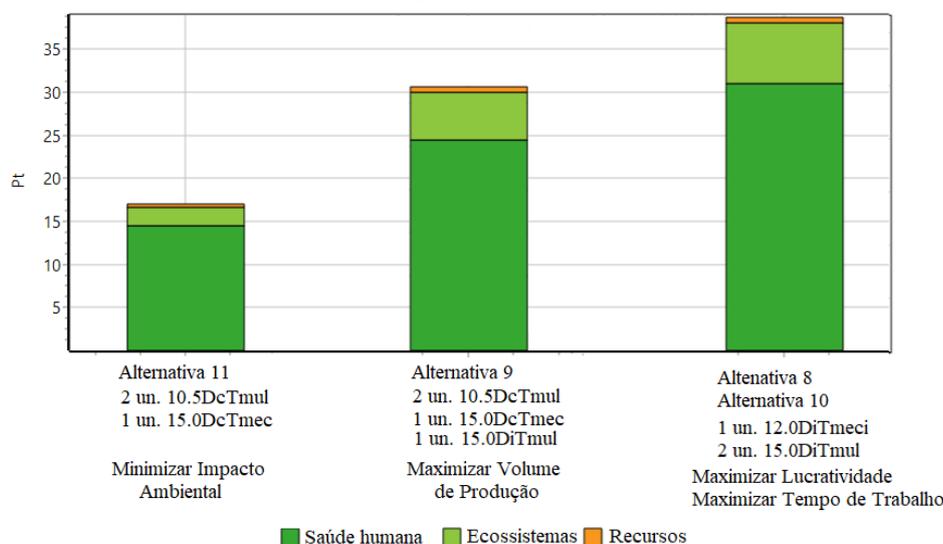
Tabela 21 - Cenários da PLI (Funções objetivo 1, 2, 3 e 4)

Modelos de Produtos	Alternativa 8	Alternativa 9	Alternativa 10	Alternativa 11
	Maximizar lucratividade (R\$)	Maximizar o volume de produção (un.)	Maximizar o tempo de trabalho (horas)	Minimizar impacto ambiental
A (10.5DcTmul)	0	2 produtos	0	2 produtos
B (10.5DiTmul)	0	0	0	0
C (12.0DiTmec)	1 produto	0	1 produto	0
D (15.0DcTmec)	0	1 produto	0	1 produto
E (15.0DiTmul)	2 produtos	1 produto	2 produtos	0
Total	R\$ 1.162,41	4 produtos	1,0193 horas	17,03Pt

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o resultado da PLI, para a fabricação diária dos produtos, foi elaborada a Figura 41, que ilustra o impacto ambiental de cada uma das alternativas.

Figura 41 - Impacto ambiental da PLI



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

A alternativa 11 (minimizar o impacto ambiental) resultou no mesmo mix de produtos da alternativa 1. As alternativas 8 e 10 (maximizar a lucratividade e o maximizar o tempo de trabalho) resultaram no mesmo mix de produtos da alternativa 6. A alternativa 9, maximizar o volume de produção, apresentou um menor impacto ambiental e comparação com as alternativas 8 e 9.

A análise dos resultados inicialmente considera as três unidades de produtos. Observa-se que avaliando o produto com ele mesmo, o aumento no impacto ambiental, lucratividade, volume de produção e tempo de trabalho cresce nas mesmas proporções de 3 para 4 produtos (33,3% para os produtos 15.0DcTmec e 10.5DcTmul). Ver Tabela 22.

Tabela 22 - Comparativo de resultados para os produtos 15.0DcTmec e 10.5DcTmul

Categoria de dados	un.	15.0DcTmec			10.5DcTmul		
		3 produtos	4 produtos	Variação %	3 produtos	4 produtos	Variação %
Saúde humana	Pt	14,00	18,66	33,3%	14,68	19,57	33,3%
Ecossistemas	Pt	2,21	2,94	33,3%	2,21	2,94	33,3%
Recursos	Pt	0,32	0,42	33,3%	0,35	0,47	33,3%
Impacto ambiental	Pt	16,525	22,03	33,3%	17,25	23,00	33,3%
Tempo de trabalho	h	0,72	0,96	33,3%	0,72	0,95	33,3%
Lucratividade	R\$	R\$ 782,32	R\$ 1.043,09	33,3%	R\$ 770,04	R\$ 1026,72	33,3%
Volume de Produção	un.	3	4	33,3%	3	4	33,3%

Fonte: elaborado pelo autor.

A seguir, nas Tabelas 23 e 24, são analisadas as alternativas 1 e 6, referentes ao mix de três produtos. A alternativa 1 apresenta o menor impacto ambiental e a alternativa 6 o maior impacto ambiental, considerando as quantidades programadas pelo PCP. Ambos são comparados com os resultados da PLI, referente ao maior volume de produção.

Percebe-se que a alternativa 1 comparada com 4 produtos da PLI (alternativa 9), resultou em um aumento no impacto ambiental, lucratividade, volume de produção e tempo de trabalho (ver Tabela 23). O aumento no impacto ambiental foi maior (percentualmente) em comparação com o volume de produção, lucratividade e tempo de trabalho. Em ambos os resultados do PCP e da PLI percebe-se que o aumento no volume de produção, lucratividade e tempo de trabalho, não cresce na mesma proporção. O PCP programa 3 produtos na linha de produção, enquanto que a PLI demonstra que é possível melhorar o volume de produção, programando 4 produtos.

Tabela 23 - Comparativo de resultados PCP alternativa 1 e PLI

Categoria de dados	PCP		PLI	Variação %
	un.	Alternativa 1	Alternativa 9	
Saúde humana	Pt	14,5	24,97	72,2%
Ecosistemas	Pt	2,21	5,45	2,4%
Recursos	Pt	0,342	0,56	63,7%
Impacto ambiental	Pt	17,052	30,98	81,6%
Tempo de trabalho	h	0,72	1,0414	44,6%
Lucratividade	R\$	R\$ 774,29	R\$ 1.168,56	50,9%
Volume de Produção	un.	3	4	33,3%

Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando a alternativa 6, com 4 produtos da PLI (alternativa 9), há uma redução no impacto ambiental. Para os critérios de lucratividade, volume de produção e tempo de trabalho ocorre aumento (ver Tabela 24). Ocorre a redução no impacto ambiental na comparação entre as alternativas 1 e 9. Em ambos os resultados do PCP e da PLI percebe-se que o aumento no volume de produção e lucratividade, não cresce na mesma proporção. A redução no impacto ambiental também não ocorre na mesma proporção. O PCP programa apenas três produtos na linha de produção, enquanto que a PLI demonstra que é possível aumentar o volume de produção e reduzir o impacto ambiental.

Tabela 24 - Comparativo de resultados PCP alternativa 6 e PLI

Categoria de dados	PCP		PLI	Variação %
	un.	Alternativa 1	Alternativa 9	
Saúde humana	Pt	31	24,97	-19,45%
Ecosistemas	Pt	7,09	5,45	-23,13%
Recursos	Pt	0,626	0,56	-10,54%
Impacto ambiental	Pt	38,716	30,98	-19,98%
Tempo de trabalho	h	1,02	1,0414	2,09%
Lucratividade	R\$	R\$ 1.162,41	R\$ 1.168,56	0,52%
Volume de Produção	un.	3	4	33,3%

Fonte: elaborado pelo autor.

O aumento proporcional do percentual de valores de impacto ambiental e quantidade de produtos fabricados somente ocorreu na comparação que é realizada na Tabela 22, quando o produto é avaliado em relação a si próprio.

Na Tabela 25 são demonstrados todos os valores de impacto, ambiental e econômico, referente as 11 alternativas do mix de produção.

Tabela 25 - Valores de impacto ambiental e econômico referente as 11 alternativas do mix de produção

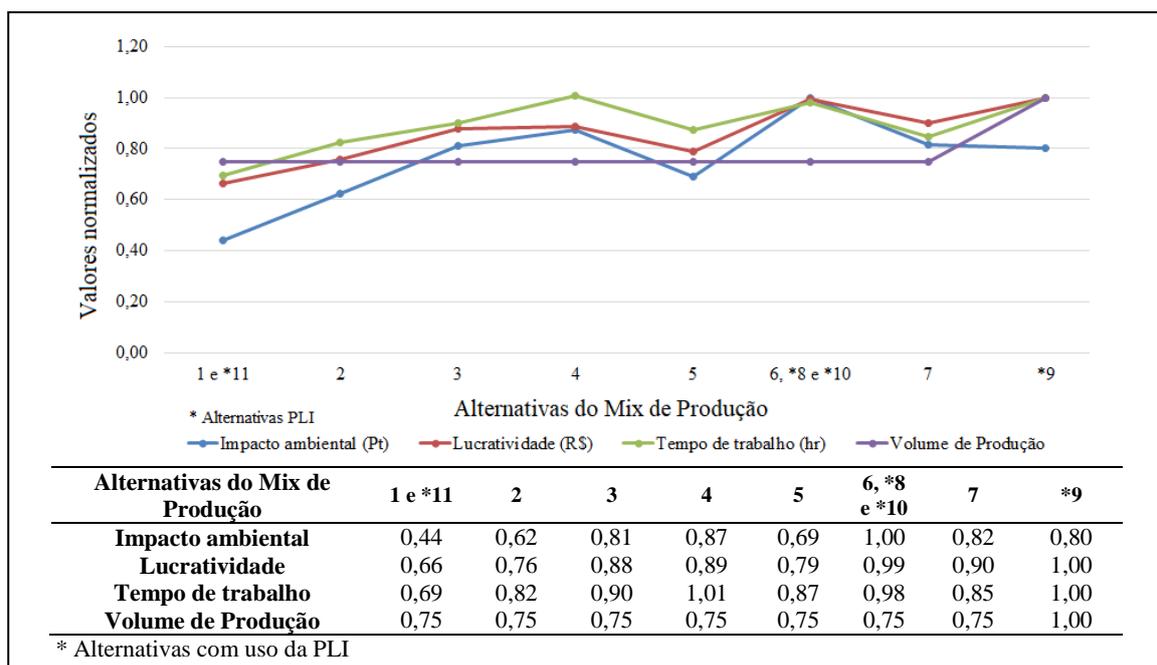
Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico		
	Saúde humana (Pt)	Ecosistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)
1 e *11	14,50	2,21	0,342	R\$ 774,29	0,7211	3,00
2	19,80	3,87	0,431	R\$ 887,23	0,8587	3,00
3	25,40	5,48	0,528	R\$ 1.024,82	0,9390	3,00
4	27,10	6,08	0,553	R\$ 1.034,97	1,0476	3,00
5	21,80	4,42	0,463	R\$ 922,03	0,9100	3,00
6, *8 e *10	31,00	7,09	0,626	R\$ 1.162,41	1,0193	3,00
7	25,60	5,43	0,536	R\$ 1.049,47	0,8817	3,00
*9	24,97	5,45	0,56	R\$ 1.168,56	1,0414	4,00

*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

Considerando os resultados da Tabela 25, foi aplicada a Equação (11) para a normalização dos valores, demonstrando o comportamento das 7 alternativas do mix de produção e das alternativas da PLI (ver Figura 42).

Figura 42 – Comparação das alternativas do mix de produção com valores normalizados



Fonte: elaborado pelo autor.

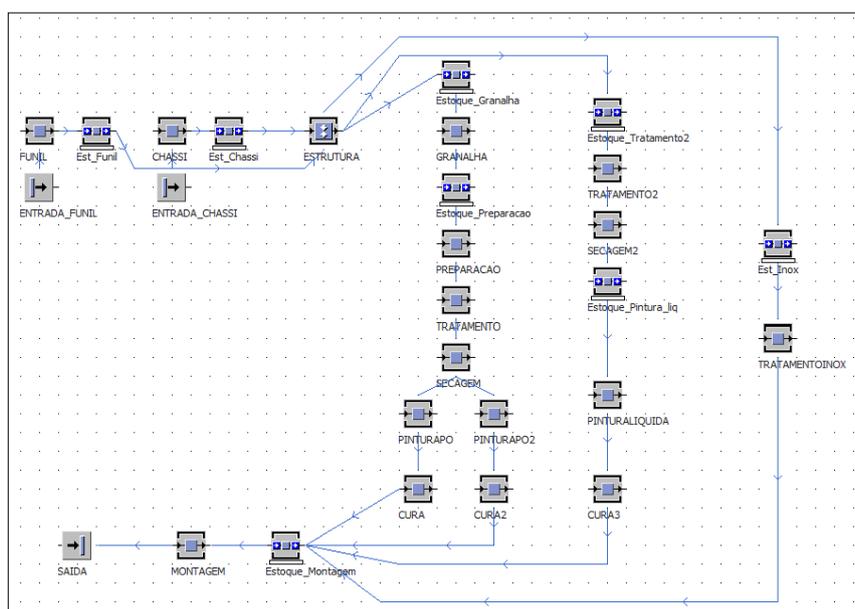
Desta forma, é possível considerar que:

- aumentar ou diminuir a quantidade produzida de um determinado produto apenas, com a mesma tecnologia de processo, faz crescer ou reduzir na mesma proporção o impacto ambiental;
- aumentar ou diminuir a quantidade produzida de vários produtos (mix de produtos), não faz crescer ou reduzir na mesma proporção o impacto ambiental;
- utilizar diferentes tecnologias de fabricação, como materiais e processos, para produzir um mix variado de produtos, altera o impacto ambiental;
- otimizar a produção pode contribuir para minimizar o impacto ambiental. Entretanto, é possível ter a produção de um mix de produtos menor e incorrer em um maior impacto ambiental, o contrário também é verdadeiro. O impacto ambiental está associado à tecnologia de fabricação (materiais e processos);
- a saúde humana é o item ambiental ao qual são atribuídas as maiores pontuações de impacto. Neste estudo foi utilizada a metodologia ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H. Dentre os principais elementos que impactam na saúde humana está o Dióxido de carbono, que é um gás associado ao efeito estufa. Na escassez de recursos fósseis, percebe-se que o principal impacto é decorrente do consumo e uso dos recursos naturais para a geração de energia.

4.4.1 Validação do modelo da programação linear inteira

Para validar o modelo matemático utilizado para a PLI, foi elaborada a simulação com o uso do software *Tecnomatix Plant Simulation* versão 15, disponibilizado pela Siemens na licença estudante, com a possibilidade de trabalhar com no máximo 80 objetos. A Figura 43 ilustra o cenário da Unidade fabril III, da empresa em estudo, seguindo a posição dos equipamentos. Os dados de entrada, utilizado na modelagem computacional, são os mesmos que foram utilizados na modelagem da PLI.

Figura 43 - Cenário elaborado no software *Plant Simulation*

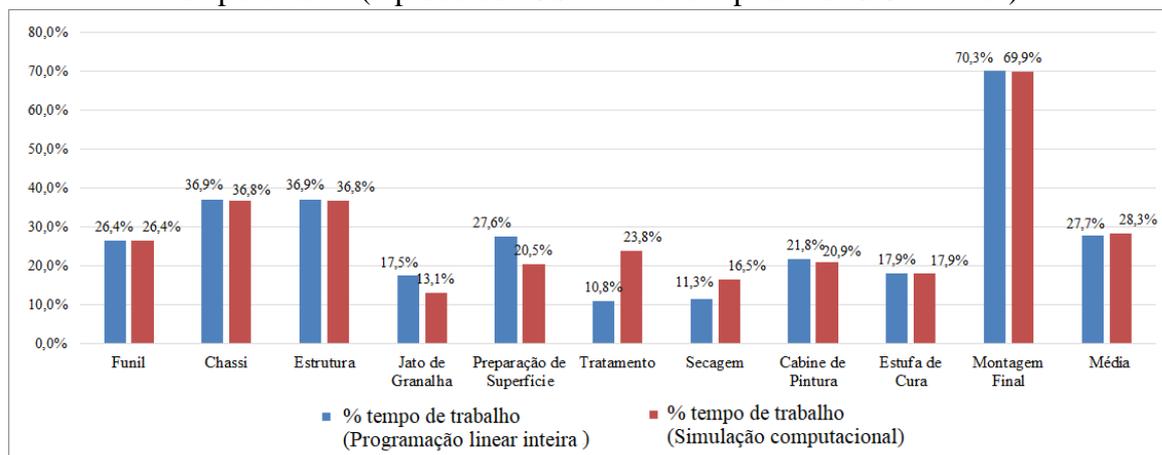


Fonte: elaborado pelo autor com uso do *Plant Simulation*.

Foi simulado o cenário da alternativa 1, que também é o mesmo da alternativa 11 da PLI (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), 3 implementos por dia, que representa a minimização do impacto ambiental. A simulação foi executada considerando um período de 250 dias de trabalho. A Figura 44 demonstra o percentual dos tempos de trabalho com o uso da PLI e da simulação computacional.

O resultado final da PLI visando a minimização do impacto ambiental foi de 3 produtos e da simulação computacional foi de 2,964 produtos, um nível de validação de 98,8% nos dados. Os valores percentuais da média dos tempos de trabalho da PLI e da simulação, tem-se 27,7% e 28,3% respectivamente.

Figura 44 - Comparação dos percentuais do tempo de trabalho entre a PLI e a simulação computacional (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec)



Fonte: elaborado pelo autor.

Tanto o estudo da simulação computacional como da PLI, não consideraram: tempos aleatórios e falhas das máquinas operatrizes. O tempo foi considerado como valor constante (tempo de processamento no software: *Const*). Como exemplo, o estudo realizado no sequenciamento da produção de rodas, também desconsiderou os tempos de falhas e os tempos aleatórios (HSU; YANG, 2017).

Outro estudo com o uso da simulação, demonstra a melhora no rendimento global de uma célula de manufatura de semicondutores associado às atividades de agendamentos de manutenção do equipamento, além da melhoria nos dados de taxa de transferência ou alocação do trabalho do equipamento, o estoque em processo (WIP), o rendimento e os estados de desgaste da máquina (LEE; NI, 2012).

Percebe-se na Figura 44 que as etapas dos processos de fabricação, como: jato de granalha, preparação de superfície, tratamento, secagem, cabine de pintura e estufa de cura, apresentam os percentuais mais baixos de tempos de trabalho. Isso se deve ao fato de que esses postos de trabalho também atendem outros produtos na fábrica, assim a capacidade fabril desses recursos visa o atendimento de amplo mix de produtos, que não é somente de carretas graneleiras.

Considera-se que na vida real, é muito difícil ter um setor produtivo trabalhando na máxima produtividade ao longo de todo o tempo. Um estudo realizado em uma indústria de implementos agrícolas, concluiu que alguns fatores impedem melhores resultados da linha de produção, como: falta de matéria-prima, aumento de pedidos urgentes e do prazo de entrega, a quebras da máquina, eventuais problemas de qualidade e atrasos na produção (HOOSE; CONSALTER; DURÁN, 2016).

4.5 Avaliação com uso da técnica AHP

Neste capítulo foram realizadas 3 análises, com o uso da técnica AHP e a análise de sensibilidade, sendo:

- 1) as 7 alternativas (mix de produtos);
- 2) as 7 alternativas (mix de produtos) e mais as alternativas da PLI;
- 3) todas as alternativas com a opinião de profissionais da indústria.

Os detalhes dos resultados estão descritos na sequência.

4.5.1 Técnica AHP com as 7 alternativas do mix de produtos

Os critérios e alternativas estão representados na Tabela 26, sendo três critérios ambientais: saúde humana, ecossistemas e recursos. E três critérios econômicos: lucratividade, tempo de trabalho e quantidade de produtos. Os dados dos critérios ambientais foram coletados com o uso do SimaPro®, representados na Tabela 25 no item 4.4. Os valores de lucratividade, tempo de trabalho e volume de produção, também foram obtidos a partir da Tabela 25.

Tabela 26 - Matriz com 6 critérios e 7 alternativas

Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico		
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)
1	14,50	2,21	0,342	R\$ 774,29	0,7211	3,00
2	19,80	3,87	0,431	R\$ 887,23	0,8587	3,00
3	25,40	5,48	0,528	R\$ 1.024,82	0,9390	3,00
4	27,10	6,08	0,553	R\$ 1.034,97	1,0476	3,00
5	21,80	4,42	0,463	R\$ 922,03	0,9100	3,00
6	31,00	7,09	0,626	R\$ 1.162,41	1,0193	3,00
7	25,60	5,43	0,536	R\$ 1.049,47	0,8817	3,00

Fonte: elaborado pelo autor.

O próximo passo foi realizar a comparação entre os critérios (ver Tabela 27). Neste caso, foi considerado um peso igual para todos os critérios.

Tabela 27 - Comparação dos critérios

Critérios	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)
Saúde humana (Pt)	1	1	1	1	1	1
Ecossistemas (Pt)	1	1	1	1	1	1
Recursos (Pt)	1	1	1	1	1	1
Lucratividade (R\$)	1	1	1	1	1	1

Tempo de trabalho (h)	1	1	1	1	1	1
Volume de Produção (un.)	1	1	1	1	1	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Com o peso igual em todos os critérios, obteve-se um $CI = 0$ e o $RC = 0$. Como o valor do $RC < 0,1$ significa que há coerência entre os pesos dos critérios (DESHMUKH; HIREMATH, 2018; MORAES; SANTALIESTRA, 2008).

Identificada a coerência entre os pesos dos critérios, foi elaborada a normalização dos valores. Observa-se que os valores de saúde humana, ecossistemas e recursos, precisam ser harmonizados e depois normalizados, pois para esses quanto maior o valor pior é a alternativa. Assim a harmonização inverte a relação de valor e consegue-se normalizar atribuindo o maior valor à alternativa que gera o menor impacto ambiental. Após os valores calculados foram inseridos na Tabela 28, e calculado o resultado final.

Tabela 28 - Matriz do resultado final das 7 alternativas

Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico			Resultado final
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)	
	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	
1	22,0%	28,1%	20,1%	11,3%	11,3%	14,3%	17,9%
2	16,1%	16,1%	15,9%	12,9%	13,5%	14,3%	14,8%
3	12,6%	11,3%	13,0%	14,9%	14,7%	14,3%	13,5%
4	11,8%	10,2%	12,4%	15,1%	16,4%	14,3%	13,4%
5	14,7%	14,1%	14,8%	13,5%	14,3%	14,3%	14,3%
6	10,3%	8,8%	11,0%	17,0%	16,0%	14,3%	12,9%
7	12,5%	11,4%	12,8%	15,3%	13,8%	14,3%	13,4%

Fonte: elaborado pelo autor.

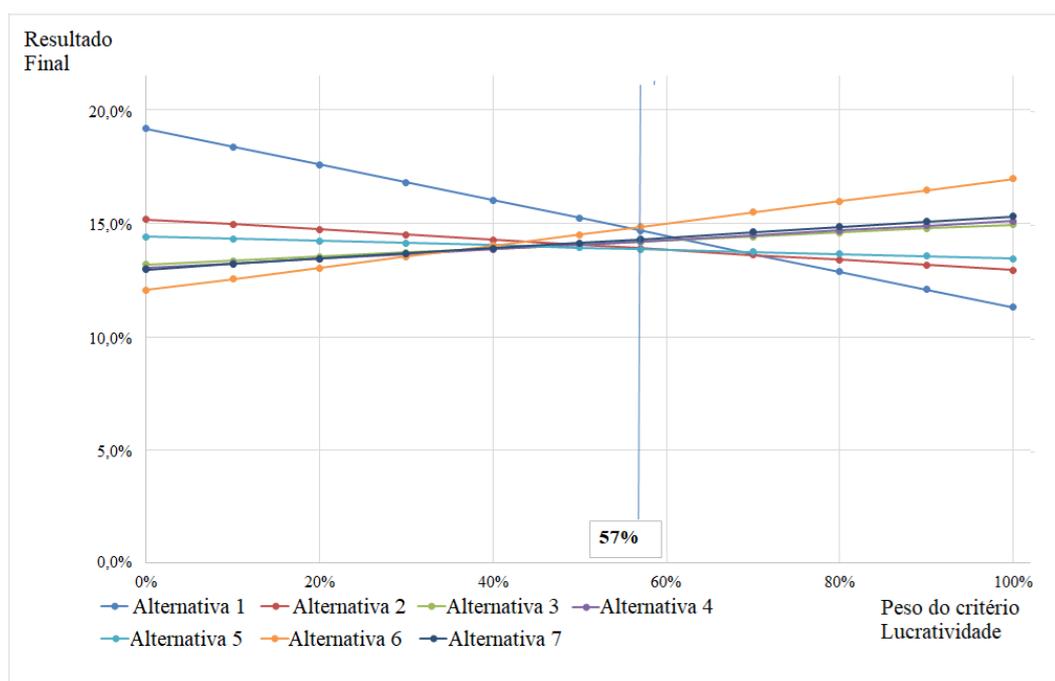
Conforme a Tabela 28, observa-se que a alternativa 1 (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), é a melhor alternativa com resultado final de 17,9%. Resultou nos melhores índices no critério de saúde humana 22,0%, ecossistemas 28,1% e recursos 20,1%. Quanto a quantidade de produtos, como todas as alternativas possuem a mesma quantidade o peso ficou equivalente em 14,3%. Na lucratividade apresenta menor desempenho 11,3% e também no critério tempo trabalho 11,3%.

A alternativa 6 (1 produto 12.0DiTmec e 2 produtos 15.0DiTmul), apresentou o pior resultado final de 12,9%. Apresenta os menores índices na saúde humana 10,3%, ecossistemas 8,8% e recursos 11,0%. Na lucratividade tem o melhor resultado 17,0%.

A Figura 45 ilustra a análise de sensibilidade, onde percebe-se que considerando todos os pesos iguais para os critérios e alterando apenas o peso do critério da

lucratividade, esse critério precisa ter um valor igual ou superior a 57% para que ocorra a inversão de preferência das alternativas. Assim, a alternativa 6 passa a ser a melhor com 14,9%. Neste mesmo ponto, em 57% de peso para a lucratividade, a alternativa 5 (2 produtos 10.5DiTmul e 1 produto 15.0DcTmec) é a pior com 13,87%.

Figura 45 - Análise de sensibilidade das 7 alternativas no critério lucratividade



Fonte: elaborado pelo autor.

4.5.2 Técnica AHP com as 7 alternativas do mix de produtos e a PLI

Os critérios e alternativas estão representados na Tabela 29. Nessa análise, as alternativas da PLI também estão incluídas (alternativas 8, 9, 10 e 11). A alternativa 11 refere-se ao menor impacto ambiental para a fabricação de 3 produtos. As alternativas 8 e 10 referem-se a maior lucratividade e tempo de trabalho respectivamente para a fabricação de 3 produtos. E a alternativa 11 refere-se ao maior volume de produção, considerando 4 produtos por dia.

Na Tabela 29, foram colocados na mesma linha as alternativas que apresentam o mesmo mix de produção, neste caso: alternativas 1 e 11; e as alternativas 6, 8 e 10. O agrupamento de alternativas que são iguais sob configuração do mix de produção, visa facilitar a análise do tomador de decisão.

Tabela 29 - Matriz com 6 critérios e 9 alternativas

Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico		
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)
1 e *11	14,50	2,21	0,342	R\$ 774,29	0,7211	3,00
2	19,80	3,87	0,431	R\$ 887,23	0,8587	3,00
3	25,40	5,48	0,528	R\$ 1.024,82	0,9390	3,00
4	27,10	6,08	0,553	R\$ 1.034,97	1,0476	3,00
5	21,80	4,42	0,463	R\$ 922,03	0,9100	3,00
6, *8 e *10	31,00	7,09	0,626	R\$ 1.162,41	1,0193	3,00
7	25,60	5,43	0,536	R\$ 1.049,47	0,8817	3,00
*9	24,97	5,45	0,560	R\$ 1.168,56	1,0414	4,00

*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

O próximo passo foi realizar a comparação entre os critérios. Neste caso, foi considerado um peso igual para todos os critérios. Com o peso igual em todos os critérios, obteve-se um $CI = 0$ e o $RC = 0$. Como o valor do $RC < 0,1$ significa que há coerência entre os pesos dos critérios. Após foi elaborada a normalização dos valores, e o cálculo da ponderação dos pesos, obtendo o resultado final que está demonstrado na Tabela 30.

Tabela 30 - Matriz do resultado final de todas as alternativas

Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico			Resultado final
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)	
	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	
1 e *11	19,5%	25,2%	17,9%	9,6%	9,7%	12,0%	15,7%
2	14,3%	14,4%	14,2%	11,1%	11,6%	12,0%	12,9%
3	11,2%	10,2%	11,6%	12,8%	12,7%	12,0%	11,7%
4	10,5%	9,2%	11,1%	12,9%	14,1%	12,0%	11,6%
5	13,0%	12,6%	13,2%	11,5%	12,3%	12,0%	12,4%
6, *8 e *10	9,1%	7,9%	9,8%	14,5%	13,7%	12,0%	11,2%
7	11,1%	10,3%	11,4%	13,1%	11,9%	12,0%	11,6%
*9	11,3%	10,2%	10,9%	14,6%	14,0%	16,0%	12,8%

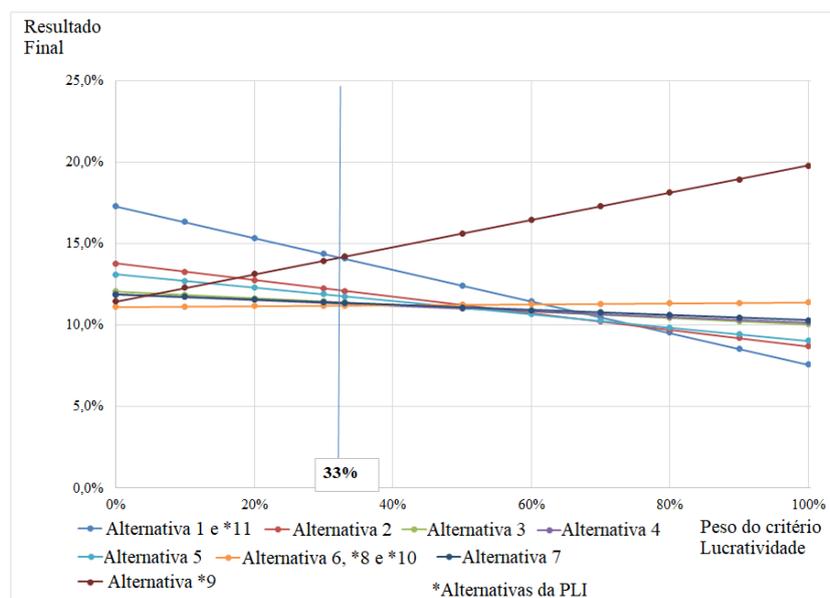
*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme Tabela 30, observa-se que a alternativa 9 (maximizar o volume de produção PLI) é a terceira melhor alternativa com resultado final de 12,8%. A alternativa 2 é a segunda melhor com resultado final de 12,9%. As alternativas 1 e 11 (minimizar impacto ambiental) são as melhores com valor 15,7%. Resultou nos índices no critério de saúde humana 19,5%, ecossistemas 25,2% e recursos 17,9%. As alternativas 6, 8 e 10 ficaram com o pior resultado em 11,2% (alternativa 8 e 10 representam a maximização da lucratividade e do tempo de trabalho respectivamente, com aplicação da PLI).

A Figura 46 ilustra a análise de sensibilidade, onde percebe-se que considerando todos os pesos iguais para os critérios e alterando apenas o peso do critério da lucratividade, este precisa ter um valor igual ou superior a 33% para que ocorra a inversão de preferência das alternativas. Assim, a alternativa 9 passa a ser a melhor com 13,3%. Neste mesmo ponto, em 33% de peso para a lucratividade, a alternativa 6, 8 e 10 são as piores com 11,2%.

Figura 46 - Análise de sensibilidade das 9 alternativas no critério lucratividade



Fonte: elaborado pelo autor.

4.5.3 Técnica AHP considerando profissionais da indústria

O pesquisador conduziu uma entrevista não estruturada junto à três especialistas, que atuam na indústria. Os profissionais serão denominados no estudo como “Profissional A”, “Profissional B” e “Profissional C”. Os nomes dos mesmos não serão divulgados, pois o foco do estudo é voltado para a tomada de decisão.

- 1) O “Profissional A” possui mais de 20 anos de experiência na indústria metalmeccânica;
- 2) O “Profissional B” possui mais de 30 anos de experiência na indústria metalmeccânica e de alimentos;
- 3) O “Profissional C” possui mais de 18 anos de experiência na indústria metalmeccânica.

Outros estudos, demonstram que no setor de manutenção de uma indústria sucroenergética, 3 especialistas participaram da avaliação do modelo de tomada de

decisão, sendo eles: o coordenador de controle de frota, analista de operações agrícolas e o gerente agrícola (CALACHE *et al.*, 2019). Outro estudo na área de manutenção, avaliou o uso de realidade aumentada, considerando os critérios de: percepção, ergonomia e usabilidade do usuário, considerou a avaliação de 12 especialistas em manutenção (DEL AMO *et al.*, 2018).

Na primeira avaliação, obtida pela média dos valores atribuídos pelos 3 profissionais, obteve-se um $CI = 0,22$ e o $RC = 0,17$, sendo superior a 0,10, mas inferior a 0,20. Há casos onde rever a atribuição dos critérios não é possível, pois não é um erro, apenas uma variação nos dados, onde o valor $RC < 0,20$ também gera resultados confiáveis (SCALA; NEEDY; RAJGOPAL, 2010).

Entretanto foi proposto fazer uma reavaliação dos valores. A segunda comparação, obtida pela média dos valores atribuídos pelos 3 profissionais entre os critérios, está representada na Tabela 31.

Tabela 31 - Comparação dos critérios por 3 profissionais

Critérios	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)
Saúde humana (Pt)	1	3	3	5	3	5
Ecossistemas (Pt)	1/3	1	3	3	3	3
Recursos (Pt)	1/3	1/3	1	3	3	5
Lucratividade (R\$)	1/5	1/3	1/3	1	3	3
Tempo de trabalho (h)	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3
Volume de Produção (un.)	1/5	1/3	1/5	1/3	1/3	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Obteve-se um $CI = 0,12$ e o $RC = 0,098$. O resultado final está na Tabela 32.

Tabela 32 - Resultado final avaliação dos profissionais

Alternativas do Mix de Produção	Ambiental			Econômico			Resultado final
	Saúde humana (Pt)	Ecossistemas (Pt)	Recursos (Pt)	Lucratividade (R\$)	Tempo de trabalho (h)	Volume de Produção (un.)	
	38,6%	22,5%	17,0%	10,0%	7,5%	4,4%	
1 e *11	19,7%	24,5%	18,0%	9,3%	9,3%	11,2%	18,3%
2	14,4%	14,0%	14,3%	10,6%	11,1%	11,2%	13,5%
3	11,2%	9,9%	11,7%	12,3%	12,1%	11,2%	11,2%
4	10,5%	8,9%	11,2%	12,4%	13,5%	11,2%	10,7%
5	13,1%	12,2%	13,3%	11,1%	11,7%	11,2%	12,6%
6, *8 e *10	9,2%	7,6%	9,9%	13,9%	13,2%	11,2%	9,8%
7	11,1%	10,0%	11,5%	12,6%	11,4%	11,2%	11,1%
*9	10,8%	12,9%	10,1%	17,8%	17,7%	21,3%	12,8%

*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

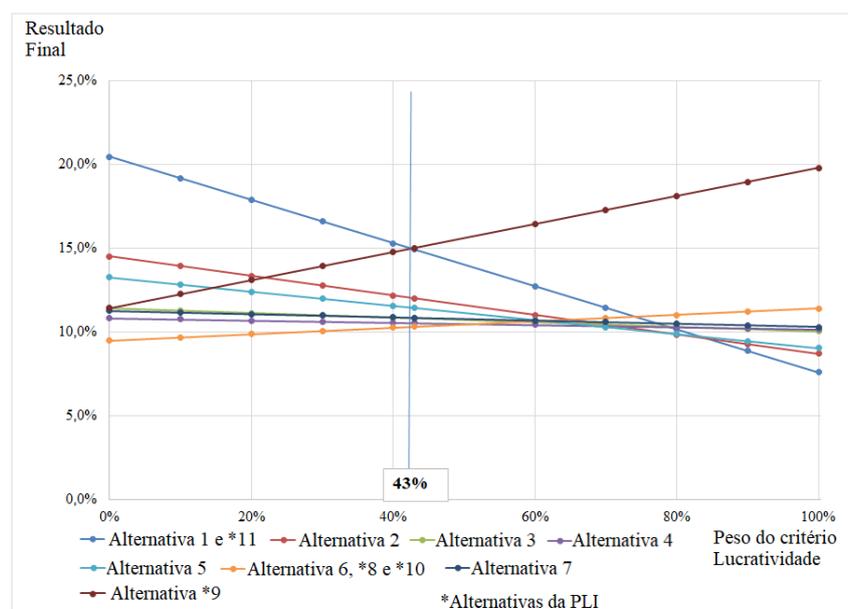
Conforme Tabela 32, observa-se que as alternativas 1 e 11 (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), são as melhores alternativas com resultado final de 18,3%. As alternativas 6, 8 e 10 (1 produto 12.0DiTmec e 2 produtos 15.0DiTmul), apresentaram o pior resultado final de 9,8%. Percebe-se que os critérios que receberam a maior pontuação na avaliação dos profissionais foram os ambientais, tendo a Saúde humana a atribuição do maior peso (38,6%).

O pesquisador questionou o “Profissional B” sobre o maior peso ter sido atribuído ao critério de Saúde humana, sendo que os critérios ambientais foram os que receberam as maiores ponderações. Então a questão: Se do ponto de vista dele isso era coerente? Segue o extrato da resposta.

A saúde humana é uma questão de respeito com as pessoas. Na situação atual em que se vive, observamos a importância da saúde. Ainda temos os demais aspectos ambientais, onde todos sabem da degradação que está ocorrendo nos ecossistemas, a situação só tende a piorar (Profissional B).

A Figura 47 ilustra a análise de sensibilidade da lucratividade, que precisa ter um valor igual ou superior a 43% para que ocorra a inversão de preferência das alternativas. Assim, a alternativa 9 passa a ser a melhor com 15,0%. Neste mesmo ponto, em 43% de peso para a lucratividade, a alternativa 6, 8 e 10, é a pior com 10,3%.

Figura 47 - Análise de sensibilidade da lucratividade



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nos resultados obtidos pela aplicação da técnica AHP, é possível considerar que:

- a) A alternativa 1 (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), foi a melhor nas 2 situações analisadas pela técnica AHP, na comparação entre 7 alternativas com a mesma pontuação entre os critérios e na avaliação com profissionais da indústria;
- b) A alternativa 9 da PLI, ficou na terceira posição e a alternativa 11 da PLI ficou na primeira posição em comparação com as demais alternativas, alocando a mesma pontuação de peso em todos os critérios e também na comparação com os profissionais da indústria. Isto demonstra que os critérios ambientais têm um peso importante na determinação da melhor alternativa, observa-se que na medida em que a indústria incorre em menores danos ambientais precisará haver menos tempo de trabalho, menor volume de produção e resultará em menor lucratividade;
- c) A análise de sensibilidade levou em consideração a alteração dos valores no critério da lucratividade. Dessa forma, a alternativa 6 é a melhor dentre as 7 alternativas avaliadas, precisando a lucratividade estar com peso igual ou acima de 57%. Considerando as 11 alternativas, a lucratividade precisa receber 33% para que a alternativa 9 seja a melhor. E no peso atribuído pelos profissionais, será necessário a lucratividade ser igual ou superior a 43% para que a alternativa 9 seja a melhor;
- d) Na análise do impacto ambiental dos materiais e processos utilizados para a fabricação dos produtos, a Saúde humana é que sofre maior impacto, seguido pelos Ecossistemas e da Escassez de Recursos. Na opinião dos profissionais a Saúde humana recebeu o maior peso de importância, seguida pelos Ecossistemas e Escassez de Recursos. Assim, se por um lado ocorre o impacto ambiental nestes critérios, os mesmos também são uma preocupação dentro da indústria;
- e) A maior importância atribuída à Saúde humana seguida de Ecossistemas e Escassez de Recursos, pode estar relacionada a maior divulgação dos ODS nas mídias. Os ODS atualmente representam o processo de decisão política mais importante em escala global definidos pela ONU (UNITED NATIONS, 2015). Tanto no setor público quanto no privado, os ODS podem ser utilizados para auxiliar a implementação de estratégias para o desenvolvimento sustentável (FILHO *et al.*, 2019);
- f) A maior importância atribuída à Saúde humana pelos profissionais da indústria também pode ser em decorrência da situação atual que está se vivenciando, com a pandemia da doença de coronavírus (COVID-19). Há várias previsões epidemiológicas que demonstram

que nossas vidas continuarão sofrendo com o distanciamento físico e o isolamento social, sendo necessário mobilizar esforços para apoiar estratégias de prevenção (DENCKLA *et al.*, 2020). Muitas políticas estão sendo implantadas pelos países, como: o distanciamento social, normas de higiene, cancelamento de eventos sociais e esportivos, uso de equipamentos de proteção individual, fechamento de escolas e restaurantes, são ações que não são necessariamente do setor da saúde, mas previnem o aumento da taxa de infecção pelo vírus (ATAGUBA; ATAGUBA, 2020).

4.6 Análise envoltória de dados (DEA)

Neste capítulo foram realizadas 2 análises para tomada de decisão, com o uso da Análise Envoltória de Dados (DEA) e a análise das folgas, sendo:

- 1) as 7 alternativas (mix de produtos);
- 2) as 7 alternativas (mix de produtos) e mais as alternativas da PLI.

Foram considerados como dados de entrada (*inputs*): tempo de trabalho. Os dados de saída (*outputs*): impacto ambiental, lucratividade e quantidade de produtos. Os valores do impacto ambiental foram obtidos a partir do somatório dos critérios de saúde humana, ecossistemas e escassez de recursos, sendo harmonizados e logo após normalizados. Desta maneira a normalização consiste em atribuir o maior peso para a alternativa que gera o menor impacto ambiental. A Tabela 33 demonstra os dados de *inputs* e *outputs* das 7 alternativas do mix de produção.

Tabela 33 - Dados de inputs e outputs das 7 alternativas do mix de produção

Alternativas do mix de produção	Inputs		Outputs	
	Tempo de Trabalho (h)	Lucratividade (R\$)	Volume de Produção (un.)	Impacto ambiental normalizado
1	0,7211	R\$ 774,29	3,00	0,23
2	0,8587	R\$ 887,23	3,00	0,16
3	0,9390	R\$ 1.024,82	3,00	0,12
4	1,0476	R\$ 1.034,97	3,00	0,12
5	0,9100	R\$ 922,03	3,00	0,15
6	1,0193	R\$ 1.162,41	3,00	0,10
7	0,8817	R\$ 1.049,47	3,00	0,12

Fonte: elaborado pelo autor.

A técnica DEA teve orientação de *Input* – Tipo: CRS. Quando a orientação é para *Inputs*, busca-se alterar a entrada de recursos para manter os mesmos resultados (saídas). A Tabela 34 demonstra o resultado na comparação das 7 alternativas do mix de produção.

Tabela 34 - Técnica DEA com orientação de *Input* – Tipo: CRS

DMU (Alternativas do Mix)	Resultado		Folgas		
	Eficiência Padrão	Tempo de trabalho (h)	Lucratividade (R\$)	Volume de Produção (un.)	Impacto ambiental normalizado
1	1	0	0	0	0
2	0,92	0,0717	0	0	0,024
3	0,92	0,0717	0	0	0,009
4	0,83	0,1744	0	0	0,013
5	0,89	0,1027	0	0	0,026
6	0,96	0,0427	0	0,32	0,036
7	1	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor.

As alternativas 1 e 7 se mostram as mais eficientes, com resultado de eficiência padrão 1. A alternativa 4 é a menos eficiente com resultado de eficiência padrão 0,83. Referente a análise das folgas, observa-se que não é necessário alterar a lucratividade para obter eficiência padrão máxima, mas devem ser reduzidos os tempos de trabalho (alternativas 2 até 6), aumentada a quantidade de produtos (alternativa 6) e reduzido o impacto ambiental (alternativas 2 até 6).

Para as alternativas que se demonstraram mais eficientes, considera-se que há uma boa relação entre o tempo de trabalho na linha de produção com uma adequada saída de produtos, lucratividade e impacto ambiental. A alternativa 1 é a que apresenta um menor tempo de horas trabalhadas, repercutindo em menor lucratividade e menor impacto ambiental. Já a alternativa 7 é a quinta alternativa com mais horas de trabalho, mesmo sendo a segunda que mais gera impactos ambientais tal fator é compensado pela lucratividade, o que faz desta também uma alternativa eficiente.

A Tabela 35 demonstra o resultado da comparação entre as 11 alternativas do mix de produção, teve a orientação de *Input* – Tipo: CRS.

Tabela 35 - Técnica DEA com orientação de *Input* – Tipo: CRS (11 alternativas)

DMU (Alternativas do Mix)	Resultado		Folgas		
	Eficiência Padrão	Tempo de trabalho (h)	Lucratividade (R\$)	Volume de Produção (un.)	Impacto ambiental (Pt)
1 e *11	1	0	0	0	0
2	0,917	0,0717	0	0	0,021
3	0,924	0,0717	0	0	0,008
4	0,834	0,1744	0	0	0,012
5	0,887	0,1027	0	0	0,023
6, *8 e *10	0,958	0,0427	0	0,323	0,032
7	1	0	0	0	0
*9	1	0,0005	0	0	0,113

*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

As alternativas 1, 7, 9 e 11 se mostram as mais eficientes, com resultado de eficiência padrão 1. A alternativa 4 é a menos eficiente com resultado de eficiência padrão 0,834. Referente a análise das folgas, observa-se que não é necessário alterar a lucratividade para obter eficiência padrão máxima, mas devem ser reduzidos os tempos de trabalho (alternativas 2 até 6 e 8 até 10), aumentada a quantidade de produtos (alternativas 6, 8 e 10) e reduzido o impacto ambiental (alternativas 2 até 6 e 8 até 10).

4.7 Comparativo entre as técnicas AHP e a DEA

A Tabela 36 demonstra o comparativo de resultados com a AHP e a DEA, na avaliação dos três modelos. Destaca-se que as técnicas AHP e DEA não possuem os mesmos objetivos. O AHP visa escolher apenas uma alternativa como sendo a melhor, enquanto o DEA busca formar uma fronteira de produtividade e eficiência com as melhores alternativas.

Tabela 36 - *Ranking* das 11 alternativas

Alternativas do Mix de Produção	AHP: Pesos Iguais	AHP: Pesos dos Especialistas	DEA: Input – Tipo: CRS
1 e *11	1°	1°	1°
2	2°	2°	4°
3	5°	5°	3°
4	6°	7°	6°
5	4°	4°	5°
6, *8 e *10	7°	8°	2°
7	6°	6°	1°
*9	3°	3°	1°

*Alternativas da PLI

Fonte: elaborado pelo autor.

Nas três avaliações as alternativas 1 e 11 (dois produtos 10.5DcTmul e um produto 15.0DcTmec) foram as melhores para o planejamento do mix de produção, considerando os critérios de tempo de trabalho, volume de produção, lucratividade e impacto ambiental. E pela DEA as alternativas 1, 7, 9 e 11 foram escolhidas pelo como sendo as mais eficientes. A alternativa 4 obteve a mesma posição na comparação do *ranking* dos pesos iguais na AHP e na DEA (6° posição).

Observa-se que é difícil obter como melhor solução um único modelo que consiga combinar um máximo resultado econômico com baixo impacto ambiental. As alternativas possuem critérios que são conflitantes entre si. O que geralmente se percebe é que a indústria ao obter maior lucratividade incorre em um maior impacto ambiental. Para gerar

um impacto ambiental menor será necessário ter menor volume de produção e lucratividade.

Tais resultados também são observados em outros estudos, onde se observa que os três pilares da sustentabilidade são conflitantes entre si. A preocupação está em obter um modelo que consiga melhorar os processos e atender de forma satisfatória os aspectos ambientais, econômicos e sociais (VALLERIO *et al.*, 2015). A obtenção de uma maior lucratividade pode ter consequências negativas nos aspectos sociais e ambientais (SPRONG *et al.*, 2019). O crescimento econômico estimula a demanda, favorece o crescimento de recursos humanos, materiais e financeiros, por outro lado tal crescimento entra em conflito com o meio ambiente (SONG; ZHANG; CAO, 2016).

Sob o ponto de vista das implicações gerenciais na indústria para a tomada de decisão, é possível perceber que:

- a) O melhor resultado é mais voltado para um menor impacto ambiental com o uso da AHP. Enquanto que com o uso da DEA é possível obter quatro alternativas eficientes: com menor impacto ambiental e/ou com melhores aspectos econômicos. A técnica DEA buscou formar uma fronteira de produtividade e eficiência, por isso foi selecionada mais de uma alternativa. Neste sentido, pode ser que a indústria prefira um mix de produção que esteja mais voltado aos melhores critérios econômicos;
- b) A técnica AHP permite tanto a avaliação de critérios qualitativos quanto quantitativos (ARUNYANART; PRUEKTHAISONG, 2018; ERTAY; RUAN; TUZKAYA, 2006; WANG *et al.*, 2021). Tal aspecto é importante para a indústria agrícola, pois poderia ser incluso na análise algum critério qualitativo considerado relevante pela gerência;
- c) Com a técnica AHP foi possível obter uma única alternativa com o mesmo mix de produção (alternativas 1 e 11) como sendo a melhor, nas duas situações avaliadas. Isso facilita a tomada de decisão sob o ponto de vista gerencial;
- d) Uma desvantagem da técnica AHP é de que muitas comparações devem ser feitas por especialistas. Os especialistas podem ter opiniões subjetivas (SINUANY-STERN; MEHREZ; YOSSI, 2000). No caso estudado, foram necessárias duas rodadas de avaliações para se chegar em um valor ideal. A pontuação foi atribuída de forma que pareça razoável (SAATY, 2005);
- e) A técnica DEA permite que em cada alternativa sejam elencados os seus próprios pesos (ERTAY; RUAN; TUZKAYA, 2006). Neste sentido foram utilizados os valores

quantitativos, apenas foi preciso harmonizar e normalizar o valor do impacto ambiental para que o mesmo pudesse ser avaliado pela DEA de forma coerente;

f) A técnica DEA faz uma avaliação global das alternativas, as DMUs que ficam fora da fronteira eficiente podem ser consideradas de baixo desempenho, e podem ser analisadas posteriormente para ver o que pode ser feito para melhorar sua eficiência (BENÍTEZ-PEÑA; BOGETOFT; ROMERO MORALES, 2020). No estudo, o resultado obtido nas folgas consiste em uma indicação do que pode ser melhorado em cada uma das alternativas. Estes são pontos importantes a serem observados pela gerência caso tenha interesse em trabalhar na melhoria da produção. Já na técnica AHP, a análise de sensibilidade para determinar a inversão de preferência nas alternativas, foi considerada mais trabalhosa;

g) Dentre as desvantagens da técnica DEA está que duas ou mais alternativas sejam eficientes (ERTAY; RUAN; TUZKAYA, 2006). No caso estudado, quatro alternativas foram consideradas mais eficientes, tanto com menor impacto ambiental quanto com melhores critérios econômicos. Um aspecto limitante da DEA, mencionado por Piran, Lacerda e Camargo (2018), é de que a comparação entre poucas DMUs pode não gerar resultados confiáveis. Dependendo da situação, tal resultado pode gerar dificuldade na tomada de decisão pela gerência;

h) A técnica AHP é a mais utilizada, tanto no modo individual como de forma híbrida (SITORUS; CILLIERS; BRITO-PARADA, 2019). Neste estudo os pesos do critério impacto ambiental foram calculados utilizando a harmonização e normalização da AHP, e também foram aplicados na DEA.

Neste estudo, a aplicação das duas técnicas, AHP e DEA, buscou avaliar a melhor alternativa para a seleção do mix de produção em uma indústria de implementos agrícolas. Entretanto, é importante considerar que os critérios econômicos do estudo são aspectos reais, utilizados pela gerência na tomada de decisão. Também foi adicionado o critério de impacto ambiental, que é considerado relevante diante do contexto global que abrange a sustentabilidade. Embora a AHP tenha sido avaliada também de forma subjetiva, os pesos atribuídos podem variar dependendo da área de atuação dos especialistas. Com a aplicação das técnicas de tomada de decisão foi possível obter uma alternativa que é comum para ambos, AHP e DEA.

Considera-se que a AHP possibilita uma decisão melhorada sob o aspecto gerencial, pelo fato de indicar apenas um único resultado (alternativa), sendo possível

trabalhar de forma híbrida e com critérios qualitativos. Já a técnica da DEA não tem os mesmos objetivos da AHP, uma vez que a DEA busca verificar qual é a DMU mais eficiente, resultando em mais de uma alternativa, pois precisa formar uma fronteira de eficiência. O estudo tem limitações na quantidade de critérios que foram avaliados, sendo os seis critérios do estudo considerados os mais importantes para a indústria em estudo. Ainda, os especialistas são atuantes na indústria agrícola, não sendo considerada a opinião de especialistas de outras áreas. A aplicação das técnicas para a tomada de decisão, apresentou resultados satisfatórios e podem ser replicadas para outras áreas.

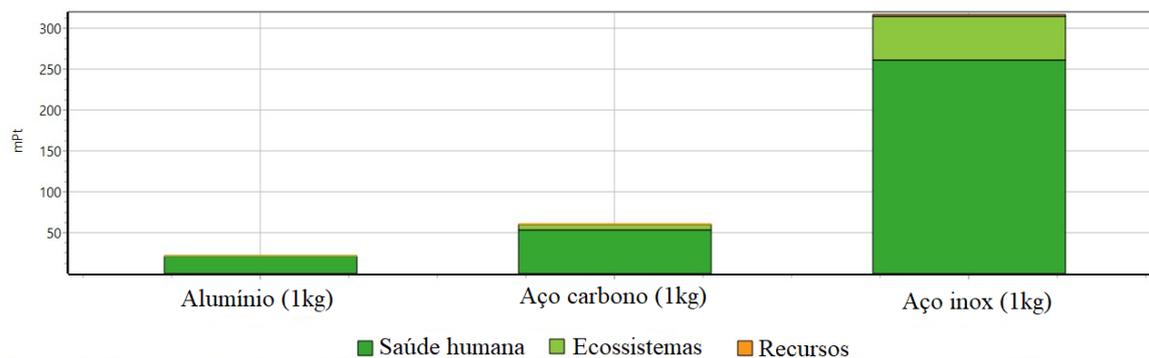
4.8 Proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação

A proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação, apresenta-se na forma de materiais e processos que podem ser utilizados na indústria de implementos agrícolas, não se limitando exclusivamente à indústria em estudo. As sugestões foram descritas levando em consideração principalmente os aspectos ambientais, com base em estudos realizados na área:

a) utilizar ligas de alumínio para a fabricação de componentes de implementos agrícolas: “o processo de estampagem é indicado para a obtenção de formas como uma carenagem de design complexo. Usos típicos do material: aplicações em aeronaves, fabricação de armas, feixes de luz, equipamentos desportivos” (SCHELESKI, 2014, p. 86). Para avaliar o impacto ambiental do uso da chapa de alumínio foi realizada a comparação desse material com a chapa de aço carbono e de aço inox, ilustrado na Figura 48, onde se observa um menor impacto ambiental do material de alumínio em relação aos demais materiais.

As informações do alumínio foram obtidas da base de dados do SimaPro®, banco de dados USLCI. O processo de revestimento da bobina inclui todos os processos conhecidos do berço ao portão necessários para o tratamento da chapa de alumínio como matéria-prima. O período dos dados é o ano de 1998, atualizado em 2014.

Figura 48 - Impacto ambiental de 1kg de alumínio comparado aos demais materiais



Fonte: elaborado pelo autor com uso do SimaPro®.

b) a indústria em estudo possui os dois sistemas de pintura: pintura a pó e pintura líquida. Vale ressaltar que o processo de pintura a pó gera impactos ambientais menores que o processo de pintura líquida, quanto aos resíduos sólidos e dos efluentes. Essa consideração pode ser constatada no estudo realizado em uma empresa metalmeccânica, onde se propôs a alteração do processo de pré-tratamento de peças metálicas a serem pintadas, visando também manter a qualidade do produto (CENTENARO, 2015);

c) as carretas graneleiras em estudo não possuem componentes fabricados a partir de polietilenos. Esse material faz parte de outra linha de produtos fabricados pela indústria em estudo. Tem-se também a sugestão de substituir parcialmente o polietileno de alta densidade virgem (PEAD-V) pelo biopolímero polietileno de alta densidade verde (PEAD-Ve) e também por polietileno de alta densidade reciclado (PEAD-R). O estudo foi elaborado a partir de corpos de prova que foram submetidos a ensaios térmicos e mecânicos, demonstrando que pelas condições estudadas, esses materiais mostraram-se viáveis para a produção de componentes na indústria de máquinas e implementos agrícolas (MAIORKA, 2014).

Cabe salientar que o uso de tais materiais e processos não são conclusivos, sendo necessária uma reavaliação dos processos de fabricação, custos e capacitação de pessoal. A indústria em estudo possui máquinas operatrizes com alto nível de tecnologia e funcionários capacitados para operação, além de programa para separação adequada de resíduos, tratamento de efluentes, entre outros.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo teve por objetivo selecionar o melhor mix de produção na linha de produção de carretas graneleiras, em uma indústria de implementos agrícolas, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão, onde no primeiro momento foi definida a indústria de implementos agrícolas para a realização do estudo, elencando-se os principais materiais e processos de fabricação, verificada a correlação desses itens e o impacto ambiental do berço-a-portão.

A motivação para a realização do estudo deve-se aos avanços dos processos de fabricação e materiais na indústria, onde são identificados os materiais mais utilizados para a fabricação dos produtos, sendo o aço carbono e aço inox, incluindo os processos de fabricação, dentre eles o corte laser.

Foi possível responder à questão da pesquisa, onde pode-se avaliar qual o impacto ambiental gerado pelo mix de produção da indústria de implementos agrícolas, com uma correlação forte entre o uso dos materiais de aço carbono, aço inox, o processo de corte laser e o impacto ambiental.

O estudo foi realizado em uma indústria de implementos agrícolas, abrangendo uma linha de produção, onde são fabricados 5 modelos de carretas graneleiras, os quais são configurados pelo PCP em 7 alternativas referentes ao mix do plano de produção. Foi aplicada a técnica de ACV com a fronteira de sistema do berço-a-portão, com uso do método ReCiPe abrangendo um conjunto de 22 categorias de impacto ambiental no ponto médio e de 3 categorias de danos no ponto final.

Considera-se que foram atendidos os objetivos geral e específicos do trabalho. Para os objetivos específicos inicialmente foi efetuado um amplo levantamento na literatura técnica acerca das potenciais aplicações das técnicas de otimização, com enfoque na programação linear e nas técnicas de tomada de decisão, aplicados na indústria. Percebe-se uma maior quantidade de estudos nas indústrias: automotiva, aeronáutica, de manufatura (fabricação) e de usinagem. Essa avaliação possibilitou a atuação do pesquisador na indústria de implementos agrícolas, trazendo assim uma contribuição para essa área.

O próximo passo foi estabelecer os valores quantitativos dos impactos ambientais, necessários para a formulação do problema de otimização. Os dados foram obtidos com o uso do método ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.03 / World (2010) H/H.

Foram realizadas as análises das matérias-primas e dos processos de fabricação, onde se constatou que a matéria-prima em aço inox promove um maior impacto ambiental comparado com os materiais de: aço carbono, PVC e a tinta líquida. O processo de corte laser gera maiores impactos ambientais comparado aos processos de: pintura com pó poliéster, solda MIG, Solda MIG inox e a zincagem de peças. A categoria de dano final da saúde humana é a mais impactada no elemento do Dióxido de carbono, gás associado ao efeito estufa. O consumo dos recursos naturais para a geração de energia é o elemento que mais impactou na escassez de recursos fósseis.

Para atingir o segundo objetivo específico foram formulados problemas de otimização dos processos de fabricação com a aplicação do método matemático, elaborando-se a modelagem com uso da programação linear inteira. Como resultado para maximizar a lucratividade e maximizar o tempo de trabalho na linha obteve-se a fabricação de 3 produtos/dia (2 produtos 15.0DiTmul e 1 produto 12.0DiTmeci), maximizar o volume de produção a fabricação de 4 produtos/dia (2 produtos 10.5DcTmul, 1 produto 15.0DcTmec e 1 produto 15.0DiTmul). Para minimizar os impactos ambientais o resultado foi a fabricação de 3 produtos/dia (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec).

O terceiro objetivo específico foi a aplicação das formulações na indústria de implementos agrícolas, que foi atingido com o uso da simulação computacional da linha de montagem da Unidade fabril III da empresa. A comparação dos resultados obtidos com a simulação computacional em comparação com a modelagem matemática da PLI, apresentou um nível de validação de 98,8% para a fabricação de 3 produtos respectivamente.

Em seguida foram realizadas as análises para tomada de decisão com uso das técnicas AHP e DEA para possibilitar que o tomador de decisão consiga identificar qual é a melhor alternativa do mix de produção considerando a sustentabilidade como um dos critérios decisórios. Foram avaliadas as 7 alternativas referentes ao mix de produção e mais as 4 alternativas da PLI. Foram estabelecidos os critérios de impacto ambiental: saúde humana, ecossistemas e escassez de recursos; e os critérios econômicos: lucratividade, tempo de trabalho na linha e volume de produção. Obteve-se como melhor resultado as alternativas 1 e 11 (2 produtos 10.5DcTmul e 1 produto 15.0DcTmec), em ambas as análises para tomada de decisão. Outro aspecto importante é de que a técnica DEA também indicou a alternativa 7 como sendo a melhor, o que demonstra que é possível optar por melhores critérios econômicos em vez de menores impactos ambientais. Como a DEA

consiste em uma abordagem não paramétrica que utiliza a técnica de programação linear para medir a eficiência das unidades de tomada de decisão, a alternativa 9 obtida a partir da PLI também foi considerada como uma das mais eficientes.

A opinião de profissionais da indústria foi importante, onde se percebeu uma maior atribuição de importância ao critério da saúde humana. Esse aspecto que pode ser motivado pela divulgação das políticas voltadas aos ODS e também a necessidade de enfrentamento da pandemia da doença do coronavírus (COVID-19).

Com base nos resultados obtidos foi possível atingir o quarto objetivo específico, que é buscar a proposição de parâmetros para a melhoria dos processos de fabricação, onde sugere-se a utilização do alumínio e a preferência pelo uso da pintura a pó. Cabe ressaltar que o uso de tais materiais e processos não são conclusivos, sendo necessária uma reavaliação dos processos de fabricação, custos e capacitação de pessoal.

Considera-se que o objetivo geral foi alcançado na seleção do melhor mix de produção na linha de produção de carretas graneleiras, em uma indústria de implementos agrícolas, considerando a sustentabilidade na aplicação de técnicas de otimização e de tomada de decisão.

A metodologia de trabalho abordada neste estudo pode contribuir com a análise do impacto ambiental voltado ao uso de materiais e processos de fabricação em outras linhas de produtos e inclusive em outras indústrias, não necessariamente do ramo metalmeccânico. As áreas de PCP e engenharia de manufatura podem fazer uso do estudo e incorporar os critérios de sustentabilidade também na análise de processos e mix de produção, assim como fazer uso das técnicas de otimização e de tomada de decisão para obter resultados sobre uma melhor eficiência da linha de produção e contribuir com os tomadores de decisão.

O resultado apresentado com o estudo indica que os materiais utilizados e os processos de fabricação apresentam diferentes impactos ambientais, porém todos tem um maior impacto na saúde humana.

Tem-se a expectativa de que esse estudo possa contribuir nas pesquisas de novos estudos e temas voltados ao tema da sustentabilidade e na aplicação de técnicas de otimização e de análise para a tomada de decisão na indústria.

5.1 Limitações do escopo do estudo e das considerações finais

O estudo apresenta limitações quanto à coleta de dados referentes aos valores de custos de matérias-primas, operações e faturamento dos produtos, que são considerados dados estratégicos para a empresa.

O escopo do trabalho consiste apenas na análise da produção de uma determinada linha de carretas graneleiras. Para a indústria em estudo, representa o produto que tem demanda constante ao longo do ano, sendo também o produto acordado entre a indústria e o pesquisador para a realização do trabalho.

A análise de sensibilidade no método AHP, se restringiu apenas ao critério da lucratividade, pois é considerado um critério importante de qualquer negócio e também da indústria que foi objeto do estudo. As considerações finais do trabalho visam apenas responder aos objetivos geral, específicos e à questão da pesquisa.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

O estudo foi realizado do berço-a-portão, sugere-se dar continuidade ao estudo, considerando também a reciclagem dos materiais utilizados nos produtos, como os componentes em aço inox e aço carbono. Em um estudo realizado em uma indústria metalmeccânica “constatou-se que do total consumido em chapas de aço ao longo do ano de 2013, em média 31% foi transformado em sucata [...] empresas recicladoras pagam apenas uma média de 14% do valor pago no quilo da chapa não conformada” (SANTOS; MARZALL; GODOY, 2015, p. 845).

Inserir entre os critérios para a tomada de decisão também a manutenção dos produtos com o aço inox e o aço carbono, considerando o aspecto de durabilidade ao desgaste e corrosão. Pode-se utilizar esse critério de forma qualitativa, pois geralmente a escolha do produtor é realizada com base em uma análise de custo/benefício, considerando a assistência técnica, que tem relação com: a durabilidade, peças de reposição e custos de manutenção do produto.

Como resultado do presente trabalho, foram publicados dois artigos em periódicos com fator de impacto, listados no Anexo 1.

REFERÊNCIAS

- ABIMAQ. Pela 3ª vez, Abimaq eleva previsão de alta em 2021. **Revista Usinagem Brasil**. 01/08/2021. Disponível em:< <http://www.usinagem-brasil.com.br/16408-pela-3a-vez-abimaq-eleva-previsao-de-alta-em-2021/pa-1/>>. Acesso em: 18 out. 2021.
- A. ALZHRANI, Fahad. Estimating Security Risk of Healthcare Web Applications: A Design Perspective. **Computers, Materials & Continua**, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 187–209, 2021.
- ABDEL-BASSET, M. et al. A conceptual hybrid approach from a multicriteria perspective for sustainable third-party reverse logistics provider identification. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 9, 2021.
- 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.
- AKINAGA, Hiroyuki. Nanofabrication technologies for All. **Sensors and Materials**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 2477–2480, 2019.
- 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.
- AMRINA, E.; VILSI, A. L. Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in cement industry. In: (Mohd. Yusof N. Seliger G., Ed.)**PROCEDIA CIRP 2015, Anais...** : Elsevier B.V., 2015.
- ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões. 5. Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- ARUNYANART, Sirawadee; PRUEKTHAISONG, Surangkana. Selection of multi-criteria plant layout design by combining AHP and DEA methodologies. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 192, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14031. Gestão ambiental - Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes**. 1 ed. Rio de Janeiro, p. 38, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. 2 ed. Rio de Janeiro, p. 22, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, p. 46, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 26000. Diretrizes sobre responsabilidade social**. 1 ed. Rio de Janeiro, p. 110, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 31000. Gestão de riscos - Diretrizes**. 2 ed. Rio de Janeiro, p. 17, 2018.

ATAGUBA, Ochea A.; ATAGUBA, John E. Social determinants of health: the role of effective communication in the COVID-19 pandemic in developing countries. **Global health action**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1788263, 2020.

ÁVILA, Lucas Veiga et al. Barriers to innovation and sustainability at universities around the world. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 164, p. 1268–1278, 2017.

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.

BACHA, Maria De Lourdes; SANTOS, Jorgina; SCHAUN, Angela. Considerações teóricas sobre o conceito de Sustentabilidade. **VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – 2010**, [s. l.], p. 1–14, 2010.

BAO, G.; ZENG, F.; WANG, M. Study on human resource allocation efficiency based on dea analysis. **International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing**, [s. l.], v. 14, p. 826–832, 2020.

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.

BENÍTEZ-PEÑA, Sandra; BOGETOFT, Peter; ROMERO MORALES, Dolores. Feature Selection in Data Envelopment Analysis: A Mathematical Optimization approach. **Omega (United Kingdom)**, [s. l.], v. 96, n. March, 2020.

BIBLIOMETRIX. The R Foundation for Statistical Computing. R version 3.6.1 (2019-07-05). 2019. Disponível em:<<http://www.bibliometrix.org>>. Acesso em: 30 de julho de 2021.

BIENER, C.; ELING, M.; WIRFS, J. H. The determinants of efficiency and productivity in the Swiss insurance industry. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 248, n. 2, p. 703–714, 2016.

BLAGA, F. S. et al. Performance evaluation of the support bush manufacturing line by modeling and simulation. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 568, n. 1, 2019.

BORREGUERO-SANCHIDRIÁN, Tamara et al. Flexible Job Shop Scheduling With Operators in Aeronautical Manufacturing: A Case Study. **IEEE Access**, [s. l.], v. 6, p. 224–233, 2018.

BRASIL, Usinagem. Anfavea eleva projeções para caminhões e máquinas. **Boletim Usinagem Brasil**. 11/10/2020. Disponível em:<

brasil.com.br/15562-anfavea-eleva-projecoes-para-caminhoes-e-maquinas/pa-1/>. Acesso em: 16 outubro 2020.

BRITO, Ronaldo; MATTOS, Claudia Aparecida De. Critical Success Factors of a Drug Traceability System for Creating Value in a Pharmaceutical Supply Chain (PSC). **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 16, n. 11, 2019.

CALACHE, Lucas Daniel Del Rosso et al. Proposta de um modelo de avaliação e de seleção de fornecedores de manutenção industrial utilizando Fuzzy-TOPSIS. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 26, n. 2, 2019.

CAMPOS, Priscilla Perla. Gestão Para a Sustentabilidade Humana Em Uma Sociedade Insustentável: Estudos Multidisciplinares Com Foco No Comportamento Humano. **Journal of Chemical Information and Modeling**, [s. l.], v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2019.

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

CARPENTER, Steve et al. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? **Ecosystems**, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 765–781, 2001.

CARVALHO, Gláucia Oliveira. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma visão contemporânea. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 789, 2019.

CATERINO, Mario et al. Simulation Techniques for Production Lines Performance Control. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 42, n. 2019, p. 91–96, 2020.

CENTENARO, Francine. **Análise ambiental da substituição do processo de pré-tratamento de superfície com banho de fosfato de zinco por nanocerâmico em uma empresa metalmeccânica**. 2015. 54 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

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.

CHENG, Hongtai; LI, Wei. Reducing the Frame Vibration of Delta Robot in Pick and Place Application: An Acceleration Profile Optimization Approach. **Shock and Vibration**, [s. l.], v. 2018, p. 1–15, 2018.

CHIU, Yuan-Shyi Peter et al. Determining optimal uptime considering an unreliable machine, a maximum permitted backorder level, a multi-delivery plan, and disposal/rework of imperfect items. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [s. l.], 2018.

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.

COELLI, Tim J. Recent Developments in Frontier Modelling and Efficiency Measurement. **Australian Journal of Agricultural Economics**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 219–245, 1995.

COM, Comissão das Comunidades Europeias. LIVRO VERDE Aspectos ambientais do PVC. [s. l.], p. 1–42, 2000.

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.

COSCIEME, Luca et al. Going beyond Gross Domestic Product as an indicator to bring coherence to the Sustainable Development Goals. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 248, p. 119232, 2020.

DADASHPOUR, I.; BOZORGI-AMIRI, A. Evaluation and Ranking of Sustainable Third-party Logistics Providers using the D-Analytic Hierarchy Process. **International Journal of Engineering, Transactions B: Applications**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 2233–2244, 2020.

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.

DANSO-ABBEAM, Gideon; BAIYEGUNHI, Lloyd J. S. Do farm-level technical efficiency and welfare complement each other? Insight from Ghana's cocoa industry. **Journal of Economic Structures**, [s. l.], v. 9, n. 1, 2020.

DEL AMO, Iñigo Fernández et al. An innovative user-centred support tool for Augmented Reality maintenance systems design: A preliminary study. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 70, p. 362–367, 2018.

DENCKLA, Christy A. et al. REACH for mental health in the COVID19 pandemic: an urgent call for public health action. **European Journal of Psychotraumatology**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2020.

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.

DESHMUKH, Ranjitsinh A.; HIREMATH, Rahul. Decision making with analytical hierarchy process for selection of furnace for foundry industry. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 189–196, 2018.

DHAVAMANI, C.; ALWARSAMY, T. Optimization of Machining Parameters for Aluminum and Silicon Carbide Composite Using Genetic Algorithm. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 38, p. 1994–2004, 2012.

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.

DIEGUEZ, Teresa et al. How can technology on the automotive industry save the future? **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 51, n. 2020, p. 1763–1772, 2020.

DUO, Z.; ZHENGPING, W.; CHENLEI, Y. Research on evaluation method of cost management and control effect of power transmission and transformation project based on BIM Technology. In: (Abdullah A. Z. Duan L., Ed.)E3S WEB OF CONFERENCES 2021, **Anais... : EDP Sciences**, 2021.

E99. Eco-indicator 99 Manual for Designers: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. **Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment**, [s. l.], p. 1–43, 2000.

ERTAY, Tijen; RUAN, Da; TUZKAYA, Umut Rifat. Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems. **Information Sciences**, [s. l.], v. 176, n. 3, p. 237–262, 2006.

FADEYI, Oluwaseun et al. Perspectives of University-Industry Technology Transfer in African Emerging Economies: Evaluating the Nigerian Scenario via a Data Envelopment Approach. **Social Sciences**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 286, 2019.

FAN, T.; XUE, D. Q. Sustainable development of cultural industry in Shaanxi Province of Northwest China: A SWOT and AHP analysis. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 8, 2018.

FANG, C. Y. From the total-factor framework to food cost performance disaggregation—developing an innovative model to enhance menu performance. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 22, p. 1–18, 2020.

FATRIAS, Dicky et al. Optimizing coal blending quality through supplier selection and order allocation: A case of cement industry. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 204, p. 0–5, 2018.

FEIL, Alexandre André; SCHREIBER, Dusan. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados. **Cadernos EBAPE.BR**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 667–681, 2017.

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.

FIKSEL, Joseph. Sustainability and resilience: toward a systems approach. **Sustainability: Science, Practice and Policy**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 14–21, 2006.

FILHO, W. Leal et al. Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 179–190, 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.

GALÁN-MARTÍN, Ángel et al. Enhanced data envelopment analysis for sustainability assessment: A novel methodology and application to electricity technologies. **Computers & Chemical Engineering**, [s. l.], v. 90, p. 188–200, 2016.

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.

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.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. **Princípios e métodos para tomada de decisão: enfoque multicritério**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

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.

GROSS, Cristiano Eduardo; HOOSE, Anderson; SCHEIDMANDEL, Nilo Alberto; KRIPKA, Moacir. Vantagens na utilização do presetter de ferramentas em máquinas CNC de uma indústria metalmeccânica. **Brazilian Journal of Business**, v. 1, p. 515-532, 2019.

GUENIN, B.; KÖNEMANN, J.; TUNÇEL, L. Solving linear programs. **A Gentle Introduction to Optimization**, [s. l.], n. 1, p. 44–98, 2018.

GULIYEVA, A. E.; LIS, M. Sustainability management of organic food organizations: A case study of Azerbaijan. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 12, 2020.

GYULAI, Dávid; PFEIFFER, András; MONOSTORI, László. Robust production planning and control for multi-stage systems with flexible final assembly lines. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 55, n. 13, p. 3657–3673, 2017.

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

HALASKOVA, Martina; GAVUROVA, Beata; KOCISOVA, Kristina. Research and development efficiency in public and private sectors: An empirical analysis of EU countries by using DEA methodology. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 17, 2020.

HAPUWATTE, Buddhika et al. Total Life Cycle Sustainability Analysis of Additively Manufactured Products. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 48, p. 376–381, 2016.

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.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B.; HUPPES, G.; LANKREIJER, R. M.; DE HAES, H. A. Hudo; SLEESWIJK, A. Wegener. Environmental Life Cycle Assessment of Products - Backgrounds and Guide LCA. Leiden: CML- Centre of Environmental Science. 1992.

HIGUEREY, Angel et al. Data envelopment analysis (DEA) for measuring the efficiency of the hotel industry in Ecuador. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 1–18, 2020.

HONG, Xiao et al. Multi-objective Optimization Method for Automatic Drilling and Riveting Sequence Planning. **Chinese Journal of Aeronautics**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 734–742, 2010.

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.

HOOSE, Anderson; CONSALTER, Luiz A.; DURÁN, Orlando M. Implementación de un sistema híbrido tipo trabajo constante en progreso (CONWIP) para control de producción en una industria de implementos agrícolas. **Informacion Tecnologica**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 111–120, 2016.

HSU, Chih Hua; YANG, Haw Ching. Real-Time Near-Optimal Scheduling with Rolling Horizon for Automatic Manufacturing Cell. **IEEE Access**, [s. l.], v. 5, p. 3369–3375, 2017.

HU, Nian-Ze; LI, Han-Lin; TSAI, Jung-Fa. Solving Packing Problems by a Distributed Global Optimization Algorithm. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2012, p. 1–13, 2012.

HUANG, D.; LIN, Z. K.; WEI, W. Optimal production planning with capacity reservation and convex capacity costs. **Advances in Production Engineering & Management**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 31–43, 2018.

HUANG, Yuan-Sheng; LIU, Shi-Jian. Chinese Green Hydrogen Production Potential Development: A Provincial Case Study. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 171968–171976, 2020.

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.

LANDA, 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.

IAQUINTO, Beatriz Oliveira. A sustentabilidade e suas dimensões. **Revista da ESMESC**, [s. l.], v. 25, n. 31, p. 157–178, 2018.

INGWERSEN, Wesley W. et al. Evaluating Consumer Product Life Cycle Sustainability with Integrated Metrics: A Paper Towel Case Study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 55, n. 12, p. 3433–3441, 2016.

JACOBI, Pedro. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, [s. l.], n. 118, p. 189–206, 2003.

JANAHIRAMAN, Tiagrajah V; AHMAD, Nooraziah; NORDIN, Farah Hani. Extreme Learning Machine and Particle Swarm Optimization in optimizing CNC turning operation. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 342, p. 012086, 2018.

JI, Wei; WANG, Lihui. Big Data Analytics Based Optimisation for Enriched Process Planning: A Methodology. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 63, p. 161–166, 2017.

JI, Wei; YIN, Shubin; WANG, Lihui. A big data analytics based machining optimisation approach. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 1483–1495, 2019.

JOSÉ, Carlos; BACHA, Caetano. Oferta e demanda de máquinas agrícolas no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, [s. l.], v. Ano XXII, p. 67–83, 2013.

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

KAMARUZZAMAN, Syahrul Nizam et al. Developing weighting system for refurbishment building assessment scheme in Malaysia through analytic hierarchy process (AHP) approach. **Energy Policy**, [s. l.], v. 112, n. October 2017, p. 280–290, 2018.

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.

KARTHEE, K.; VISHAL SANKAR, S.; RAJ, S. Y. Improvement of overall performance of micro/small scale industries (MSSI) using multi-criteria decision making (MCDM). In: (Prabhu S. Ambigai R. Stalin John M.R. Senthil R., Ed.) IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 2018, **Anais...** : Institute of Physics Publishing, 2018.

KAZEMI, S. et al. A common weights model for investigating efficiency-based leadership in the russian banking industry. **RAIRO - Operations Research**, [s. l.], v. 55, n. 1, p. 213–229, 2021.

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.

KUDURS, E. et al. Are Industries Open for Renewable Energy? **Environmental and Climate Technologies**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 447–456, 2020.

KUMAR, Kalla Kiran et al. Evaluation and Selection of Best Priority Sequencing Rule in Job Shop Scheduling using Hybrid MCDM Technique. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 197, n. 1, 2017.

KUMAR, Sanjay; DUHAN, Manish; HALEEM, Abid. Evaluation of factors important to enhance productivity. **Cogent Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2016.

LACHTERMACHER, Gerson. Pesquisa operacionla na tomada de decisões. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LARSON, Ron; FABER, Betsy. **Estatística aplicada**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

LEE, Amy H. I. et al. An integrated performance evaluation model for the photovoltaics industry. **Energies**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1271–1291, 2012.

LEE, Choonjoo; LEE, Jeong-dong; KIM, Tai-yoo. Innovation policy for defense acquisition and dynamics of productive efficiency: A DEA application to the Korean defense industry. **Asian Journal of Technology Innovation**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 151–171, 2009.

LEE, Seungchul; NI, Jun. Genetic Algorithm for Job Scheduling with Maintenance Consideration in Semiconductor Manufacturing Process. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2012, p. 1–16, 2012.

LIU, H. et al. Regional green eco-efficiency in china: Considering energy saving, pollution treatment, and external environmental heterogeneity. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 17, 2020. a.

LIU, J. et al. Study on coupling optimization model of node enterprises for energy storage-involved photovoltaic value chain in China. **Energy Reports**, [s. l.], v. 6, p. 69–81, 2020. b.

LIU, X. X. et al. Productivity assessment of the real estate industry in China: A two-stage malmquist productivity index. **International Journal of Strategic Property Management**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 146–168, 2021.

LU, Tao; KUDARAVALLI, Ravikumar; GEORGIU, George. Cryogenic Machining through the Spindle and Tool for Improved Machining Process Performance and Sustainability: Pt. II, Sustainability Performance Study. **Procedia Manufacturing**, [s. l.],

v. 21, n. 2017, p. 273–280, 2018.

LUCAS, Elysia et al. Global environmental and nutritional assessment of national food supply patterns: Insights from a data envelopment analysis approach. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 755, p. 142826, 2021.

LUNDMARK, Robert et al. Meeting Challenges in Forestry: Improving Performance and Competitiveness. **Forests**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 208, 2021.

MADIĆ, Miloš; RADOVANOVIĆ, Miroslav. Optimization of machining processes using pattern search algorithm. **international journal of industrial engineering computations**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 223–234, 2014.

MAIORKA, Jaqueline Varela. **Aplicação de polímeros sustentáveis na indústria de máquinas e implementos agrícolas**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed., São Paulo: Atlas, 2019.

MARINHO, M. et al. Effective cloud resource utilisation in cloud erp decision-making process for industry 4.0 in the united states. **Electronics (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 8, 2021.

MARJANOVIĆ, Nenad et al. Volume optimization of gear trains with spur gears using genetic algorithm. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 121, p. 01007, 2017.

MATOUŠEK, Jiří; GÄRTNER, Bernd. **Understanding and using linear programming**. [s.l: s.n.]. v. 44, 2007.

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.

MEHRI KHANSARI, Nabi et al. Development of an optimal process for friction stir welding based on GA-RSM hybrid algorithm. **Frattura ed Integrità Strutturale**, [s. l.], v. 12, n. 44, p. 106–122, 2018.

MIAN, S. H. et al. Adapting universities for sustainability education in industry 4.0: Channel of challenges and opportunities. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 15, 2020.

MILOŠEVIĆ, Mimica R. et al. Fuzzy and interval ahp approaches in sustainable management for the architectural heritage in smart cities. **Mathematics**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 1–29, 2021.

MOENGIN, P. et al. Integer Linear Programming Model and Algorithm to Integrate Heuristics Scheduling EDD, Inventory Control and Distribution Problems in a Modular Production System. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 528, n. 1, 2019.

MOLE, Nikolaj; CAFUTA, Gašper; ŠTOK, Boris. A Method for Optimal Blank Shape Determination in Sheet Metal Forming Based on Numerical Simulations. **Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 237–250, 2013.

MORAES, E. A.; SANTALIESTRA, R. Modelo de Decisão com Múltiplos Critérios para Escolha de Software de Código Aberto e Software de Código Fechado. **Revista Organizações em Contexto**, [s. l.], v. 4, n. 7, p. 59–83, 2008.

MOURONTE-LÓPEZ, M. L. Optimizing the Spare Parts Management Process in a Communication Network. **Journal of Network and Systems Management**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 169–188, 2018.

MUFF, Katrin; KAPALKA, Agnieszka; DYLLICK, Thomas. The Gap Frame - Translating the SDGs into relevant national grand challenges for strategic business opportunities. **International Journal of Management Education**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 363–383, 2017.

NAZARI, Mateus Torres et al. 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.

NOUR-EDDINE M'HAOUACHE et al. Reliability and Optimization of the Manufacturing of Steel Flanges, by using Mechanical Method, Statistical Method, Firefly Algorithm. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 99–110, 2019.

OCAMPO, Lanndon A. A hierarchical framework for index computation in sustainable manufacturing. **Advances in Production Engineering and Management**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 40–50, 2015.

OESTERLE, Jonathan; BAUERNHANSL, Thomas; AMODEO, Lionel. Hybrid Multi-objective Optimization Method for Solving Simultaneously the line Balancing, Equipment and Buffer Sizing Problems for Hybrid Assembly Systems. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 57, p. 416–421, 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.

PACANA, A.; SIWIEC, D.; BEDNÁROVÁ, L. Method of choice: A fluorescent penetrant taking into account sustainability criteria. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 14, 2020.

PACHAR, Nomita; GUPTA, Anshu; JHA, P. C. BI- Level programming dea approach for efficiency evaluation: A case study of indian electronics retail stores. **Yugoslav Journal of Operations Research**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 461–481, 2020.

PAKKAR, Mohammad Sadegh. Using DEA and AHP for hierarchical structures of data. **Industrial Engineering and Management Systems**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 49–62, 2016.

PAKPAHAN, Eka KA; KRISTINA, Sonna; SETIAWAN, Ari. Proposed algorithm to improve job shop production scheduling using ant colony optimization method. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 277, p. 012050, 2017.

PAN, Y. C.; CHIU, Y. H. Formulating assessment indices and strategies for the transition to local industrial development in Taoyuan City, Taiwan. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 3, 2017.

PENG, Q. et al. Research on connection structure of aluminumbody bus using multi-objective topology optimization. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 292, p. 012056, 2018.

PÉREZ-DOMÍNGUEZ, Luis et al. Hesitant fuzzy linguistic term and TOPSIS to assess lean performance. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 9, n. 5, 2019.

PÉREZ-PONS, M. E. et al. Increasing profitability and monitoring environmental performance: a case study in the agri-food industry through an edge-iot platform. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–16, 2021.

PIRAN, F. S.; LACERDA, D. P.; CAMARGO, L. F. R. **Análise e Gestão Da Eficiência**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

PISHDAR, Mahsa et al. Interval Type-2 Fuzzy Super SBM Network DEA for Assessing Sustainability Performance of Third-Party Logistics Service Providers Considering Circular Economy Strategies in the Era of Industry 4.0. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 6497, 2021.

PODGÓRSKI, D. Measuring operational performance of OSH management system - A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. **Safety Science**, [s. l.], v. 73, p. 146–166, 2015.

POLAT, G.; BINGOL, B. N. Data Envelopment Analysis (DEA) approach for making the bid/no-bid decision: A case study in a Turkish construction contracting company. **Scientia Iranica**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 497–511, 2017.

RAN, Renjie; LI, Wenqiang; LI, Yan. A two-level global optimization method based on hybrid metamodel for expensive problems. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 168781401876954, 2018.

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.

REGINATO, Gustavo et al. Balanceamento de linha de montagem mista em cenários com distintos mix de produtos. **Gestão & Produção**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.294-307, 29 set. 2015.

REIS, I. F. C. et al. An evaluation thermometer for assessing city sustainability and

livability. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 47, 2019.

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.

RIVM. ReCiPe 2016 v1.1. [s. l.], p. 201, 2017. Disponível em: <www.rivm.nl/en> Acesso em: 19 maio. 2020.

ROMERO-SILVA, R.; DE LEEUW, S. Learning from the past to shape the future: A comprehensive text mining analysis of OR/MS reviews. **Omega (United Kingdom)**, [s. l.], v. 100, 2021.

ROY, Papon; MIAH, Md. Danesh; ZAFAR, Md. Tasneem. Environmental impacts of bicycle production in Bangladesh: a cradle-to-grave life cycle assessment approach. **SN Applied Sciences**, [s. l.], v. 1, n. 7, p. 1–16, 2019.

SAATY, T. L. Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. **RWS publications.**, [s. l.], 2005.

SALVADO, M. F. et al. Proposal of a sustainability index for the automotive industry. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 2113–2144, 2015.

SAMATTAPAPONG, Nara; AFZULPURKAR, Nitin. A production throughput forecasting system in an automated hard disk drive test operation using GRNN. **Journal of Industrial Engineering and Management**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 330, 2016.

SANTOS, Lucas Almeida dos; MARZALL, Luciana Figuera; GODOY, Leoni Pentiado. (RE) Aproveitamento de sucada no ramo metal-mecânico frente à sustentabilidade ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v. 19, n. 2, mai-ago. 2015, p. 830–847, 2015.

SARRAF, Iman Sari; GREEN, Daniel E. Prediction of DP600 and TRIP780 yield loci using Yoshida anisotropic yield function. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 418, p. 012089, 2018.

SARTORI, Simone; LATRÔNICO, Fernanda; CAMPOS, Lucila M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 01–22, 2014.

SAURIN, Tarcisio Abreu; FERREIRA, Cléber Fabrício. Avaliação qualitativa da implantação de práticas da produção enxuta: estudo de caso em uma fábrica de máquinas agrícolas. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 15, n. 3, p. 449-462, set.-dez. 2008.

SCALA, Natalie M.; NEEDY, Kim La Scola; RAJGOPAL, Jayant. Using the analytic hierarchy process in group decision making for nuclear spare parts. **31st Annual National Conference of the American Society for Engineering Management 2010, ASEM 2010**, [s. l.], p. 191–199, 2010.

SCHELESKI, Samuel. **Seleção de materiais no projeto de máquinas agrícolas**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

SCHOEPPF, 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.

SHANBAG, Amit; MANJARE, Sampatrao. Life cycle assessment of tyre manufacturing process. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 22–34, 2020.

SHAO, Chao et al. Modular Design and Optimization for Intelligent Assembly System. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 76, p. 67–72, 2018.

SHARMA, Vishal S. et al. Process Parameter Optimization for Abrasive Water Jet Machining of Titanium Alloy Using Meta-Heuristic Algorithms. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 221, p. 01004, 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.

SHIM, Hyunsook; KIM, Taeyeon; CHOI, Gyunghyun. Technology roadmap for eco-friendly building materials industry. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 5, 2019.

SHIN, J.; KIM, Y.; KIM, C. The perception of occupational safety and health (Osh) regulation and innovation efficiency in the construction industry: Evidence from South Korea. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1–14, 2021.

SHIRAKAWA, Masakazu; ARAKAWA, Masao. Multi-objective optimization system for plant layout design (3rd report, Interactive multi-objective optimization technique for pipe routing design). **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. JAMDSM0053–JAMDSM0053, 2018.

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.

SILVA, Alexandre Navarro et al. Contribution of computational simulation for layout analysis in a wooden furniture industry. **Revista Árvore**, [s.l.], v. 41, n. 2, p.1-8, 26 jun. 2017.

SILVA, Glauco Garcia Martins Pereira da; TUBINO, Dalvio Ferrari; SEIBEL, Silene. Linhas de montagem: revisão da literatura e oportunidades para pesquisas futuras. **Production**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.170-182, 11 mar. 2014.

SILVA, T. E. P. et al. Enxofre: Um Poluente Em Potencial Na Composição Do Óleo Diesel Brasileiro. **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, [s. l.], p. 1–6, 2013.

SIMEONOVSKI, K.; KAFTANDZIEVA, T.; BROCK, G. Energy efficiency management across eu countries: A dea approach. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 9, 2021.

SINGH, Ritika et al. Application of DEA for Performance Evaluation of Indian

Microfinance Institutions. **Asian Journal of Management Research**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 597–605, 2014.

SINUANY-STERN, Z.; MEHREZ, Abraham; YOSSI, Hadad. An AHP/DEA methodology for ranking decision making units. **International Transactions in Operational Research**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 109–124, 2000.

SITORUS, Fernando; CILLIERS, Jan J.; BRITO-PARADA, Pablo R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 121, p. 393–417, 2019.

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.

SONG, K. H.; CHOI, S.; HAN, I. H. Competitiveness evaluation methodology for aviation industry sustainability using network DEA. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 1–16, 2020.

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.

STEPONAVIČĖ, Ingrida; RUUSKA, Sauli; MIETTINEN, Kaisa. A solution process for simulation-based multiobjective design optimization with an application in the paper industry. **Computer-Aided Design**, [s. l.], v. 47, p. 45–58, 2014.

STICHHAUEROVA, E.; ZIZKA, M.; PELLONEOVA, N. Comparison of the significance of clusters for increasing business performance. **Journal of Competitiveness**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 172–189, 2020.

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.

SUN, Kangkang; WANG, Guoqiang; LU, Yanpeng. Optimization method of bevel gear reliability based on genetic algorithm and discrete element. **Ekspolatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 186–196, 2019.

TANG, Xingang; BASSIR, David Hicham; ZHANG, Weihong. Shape, sizing optimization and material selection based on mixed variables and genetic algorithm. **Optimization and Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 1–2, p. 111–128, 2011.

TAO, Z. Research on the degree of coupling between the urban public infrastructure system and the urban economic, social, and environmental system: A case study in Beijing, China. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2019, 2019.

THAI, Vantrong et al. Optimizing SVM's parameters based on backtracking search optimization algorithm for gear fault diagnosis. **Journal of Vibroengineering**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 66–81, 2019.

TSAI, Ming-Chi. Developing a sustainability strategy for Taiwan's tourism industry after the COVID-19 pandemic. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. e0248319, 2021.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. **A/RES/70/1. UN General Assembly**. New York, [s. l.], n. October, p. 1–35, 2015.

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.

VISENTIN, Caroline et al. Application of life cycle assessment as a tool for evaluating the sustainability of contaminated sites remediation: A systematic and bibliographic analysis. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 672, p. 893–905, 2019.

VISSER, Wayne; ELKINGTON, John. Cannibals with Forks. **The Top 50 Sustainability Books**, [s. l.], n. April, p. 108–112, 2013.

VUKOMANOVIC, M.; RADUJKOVIC, M. The balanced scorecard and EFQM working together in a performance management framework in construction industry. **Journal of Civil Engineering and Management**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 683–695, 2013.

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. et al. Applying data envelopment analysis and grey model for the productivity evaluation of Vietnamese agroforestry industry. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 11, 2016. a.

WANG, C. N. et al. Performance evaluation of Major Asian Airline companies using DEA Window model and Grey Theory. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 9, 2019. a.

WANG, C. N. et al. Supporting better decision-making: A combined grey model and data envelopment analysis for efficiency evaluation in e-commerce marketplaces. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 1–24, 2020. a.

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.

WANG CHEN, Hsiu Mei et al. A Fuzzy MCDM Approach for Green Supplier Selection from the Economic and Environmental Aspects. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2016, 2016.

WANG, Chia Nan et al. Supporting better decision-making: A combined grey model and data envelopment analysis for efficiency evaluation in e-commerce marketplaces. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 1–24, 2020. b.

WANG, Chia Nan; YANG, Ching Yu; CHENG, Hung Chun. A fuzzy multicriteria decision-making (MCDM) model for sustainable supplier evaluation and selection based on triple bottom line approaches in the garment industry. **Processes**, [s. l.], v. 7, n. 7, p. 1–13, 2019.

WANG, Cynthia Changxin et al. Green performance evaluation system for energy-efficiency-based planning for construction site layout. **Energies**, [s. l.], v. 12, n. 24, p. 1–21, 2019. b.

WANG, Peng et al. Modeling and Optimizing Energy Utilization of Steel Production Process: A Hybrid Petri Net Approach. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 5, p. 191963, 2013.

WANG, Q. et al. AHP based evaluation model of energy efficiency for energy internet. In: (Defilla S. Zhang L. Chu W., Ed.)E3S WEB OF CONFERENCES 2021, **Anais... : EDP Sciences**, 2021.

WANG, S. H. et al. Performance indicator framework for evaluation of sustainable tourism in the Taiwan coastal zone. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 7, 2016. b.

WANG, Zhongqi et al. Optimization of riveting parameters using Kriging and particle swarm optimization to improve deformation homogeneity in aircraft assembly. **Advances in Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. 168781401771900, 2017.

WARIS, M. et al. An application of analytic hierarchy process (ahp) for sustainable procurement of construction equipment: Multicriteria-based decision framework for malaysia. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2019, 2019.

WATTANASIRISETH, P.; KRAIRIT, A. An Application of Cutting-Stock Problem in Green Manufacturing: A Case Study of Wooden Pallet Industry. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 530, p. 012005, 2019.

WU, Wenbo; ZENG, Jiani; HUANG, Zhengdong. A hybrid optimization approach for setup planning with tolerance constraints. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 249, p. 03012, 2018.

WU, Zhenyu et al. Multi-Objective Optimization Design of Constant Stress Accelerated Degradation Test Using Inverse Gaussian Process. **IEEE Access**, [s. l.], v. 7, p. 28757–28768, 2019.

WULF, Christina et al. Sustainable Development Goals as a Guideline for Indicator Selection in Life Cycle Sustainability Assessment. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 69, n. May, p. 59–65, 2018.

XIE, Wei; WANG, Jie-Sheng; WANG, Hai-Bo. PI Controller of Speed Regulation of Brushless DC Motor Based on Particle Swarm Optimization Algorithm with Improved Inertia Weights. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2019, p. 1–12, 2019.

XU, J. et al. Environmental efficiency assessment of heavy pollution industry by data envelopment analysis and malmquist index analysis: Empirical evidence from China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 18, n. 11, 2021.

XU, Wenjun et al. Energy-Efficient Multi-Level Collaborative Optimization for Robotic Manufacturing Systems. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 72, p. 316–321, 2018.

XU, X. et al. Low-carbon efficiency model evaluation of china's iron and steel enterprises based on data and empirical evidence. **Intelligent Automation and Soft Computing**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 1063–1072, 2020.

YANG, J. et al. Carbon emissions performance in logistics at the city level. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 231, p. 1258–1266, 2019.

YANG, Yuan et al. Multiobjective Optimization for Fixture Locating Layout of Sheet Metal Part Using SVR and NSGA-II. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2017, p. 1–10, 2017.

YATES, Joshua J. Abundance on Trial: The Cultural Significance of " Sustainability " 1 How " Sustainability " Became a Word for Our Time. *The hedgehog Review* [s. l.], 2012.

YIN, Pengzhen; YANG, Min; YANG, Ranran. Investigating the effects of IT capability on hotel performance based on DEA approach: An empirical example of international hotels in Hong Kong. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 17, 2020.

YING, Kuo-Ching; LU, Chung-Cheng; LIN, Shih-Wei. Improved Exact Methods for Solving No-Wait Flowshop Scheduling Problems With Due Date Constraints. **IEEE Access**, [s. l.], v. 6, p. 30702–30713, 2018.

YING, M. Based on the background of information technology, the integration of agricultural product processing industry and green ecological industry in Gansu Province. In: (Fu Y. Mansur K.H.M., Ed.)E3S WEB OF CONFERENCES 2021, **Anais... : EDP Sciences**, 2021.

ZHANG, J. et al. Impact of environment regulation on the efficiency of regional construction industry: A 3-stage Data Envelopment Analysis (DEA). **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 200, p. 770–780, 2018.

ZHANG, X. et al. Evaluating water management practice for sustainable mining. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 414–433, 2014.

ZHANG, Z.; FEI, R. Illuminating the efficiency of CO₂ emissions in China's mining sector: evidence from meta-frontier Malmquist index models. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 1823–1836, 2021.

Anexo 1 - Produção científica relacionada com a tese

Artigos publicados

HOOSE, Anderson; KRIPKA, Moacir. Correlational investigation of manufacturing technology and environmental impact in an agricultural machinery industry. **Global NEST Journal**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 186–194, 2021. Disponível em: <https://journal.gnest.org/publication/gnest_03691>

HOOSE, Anderson; YEPES, Víctor; KRIPKA, Moacir. Selection of Production Mix in the Agricultural Machinery Industry Considering Sustainability in Decision Making. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 16, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/9110>>



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br