

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
DOUTORADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

FERNANDO DE OLIVEIRA LEMOS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO
CENTRALIZADA E DESCENTRALIZADA COM MANUFATURA ADITIVA:
DESENVOLVIMENTO DE UM *FRAMEWORK* PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO
HÍBRIDO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
(DES-LCA)**

Porto Alegre
2024

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS DE
PRODUÇÃO CENTRALIZADA E DESCENTRALIZADA COM
MANUFATURA ADITIVA: DESENVOLVIMENTO DE UM
FRAMEWORK PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO HÍBRIDO
DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E AVALIAÇÃO DO
CICLO DE VIDA (DES-LCA)**

FERNANDO DE OLIVEIRA LEMOS

ENGENHEIRO QUÍMICO

MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ORIENTADOR: PROF. DR. Felipe Dalla Vecchia

Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Março, 2024**

Ficha Catalográfica

L557a Lemos, Fernando de Oliveira

Avaliação do desempenho ambiental de sistemas de produção centralizada e descentralizada com Manufatura Aditiva : desenvolvimento de um framework para implementação de um modelo híbrido de Simulação de Eventos Discretos e Avaliação do Ciclo de Vida (DES-LCA) / Fernando de Oliveira Lemos. – 2024.

244 p.

Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Dalla Vecchia.

1. Desempenho ambiental. 2. Simulação de Eventos Discretos. 3. Avaliação do Ciclo de Vida. 4. Produção centralizada. 5. Produção descentralizada. I. Dalla Vecchia, Felipe. II. Título.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS
DE PRODUÇÃO CENTRALIZADA E DESCENTRALIZADA COM
MANUFATURA ADITIVA: DESENVOLVIMENTO DE UM
FRAMEWORK PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO
HÍBRIDO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS E
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (DES-LCA)**

CANDIDATO: FERNANDO DE OLIVEIRA LEMOS

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. FELIPE DALLA VECCHIA - ORIENTADOR


BANCA EXAMINADORA



DR. FRANCISCO JOSÉ KLIEMANN NETO - ESCOLA DE ENGENHARIA - UFRGS

Miguel A. Sellitto

DR. MIGUEL AFONSO SELBITTO - PPG EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS E PPG EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS - UNISINOS



DR. NÉSTOR FABIÁN AYALA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - UFRGS



DR. MARCUS SEFERIN - DO PGTEMA - ESCOLA POLITÉCNICA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

*O maior bem do homem é uma
mente inquieta.*

(Isaac Asimov)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha esposa por todo o apoio e compreensão durante o período de doutoramento. Aos meus filhos, que vibraram quando souberam que eu tinha acabado e que sobraria mais tempo para ficar com eles. E aos meus pais, que estão sempre me apoiando e ajudaram muito ficando com os netos em muitos finais de semana. Só assim consegui estudar e trabalhar na Tese.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Felipe Dalla Vecchia pela orientação, parceria e paciência no processo de doutoramento. As conversas (orientações) sempre foram motivadoras e foram fundamentais para que eu conseguisse defender a Tese. Sou grato pela oportunidade de trabalhar com o colega e fortalecer nossos laços de amizade.

Ao amigo Dr. Victor Hugo Jacks M. dos Santos, do Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais da PUCRS, pelas discussões técnicas e sugestões sobre a estrutura do trabalho e as análises realizadas.

À equipe do IDEIA-PUCRS e do TECNOPUC, que apoiou o presente estudo disponibilizando dados e informações sobre o estudo de caso abordado. À equipe do Laboratório de Eficiência Energética da PUCRS (LABEE-PUCRS), em especial ao amigo Prof. Odilon Francisco Pavón Duarte.

Ao Prof. Dr. Hélio Radke Bittencourt pelas orientações sobre o tema clusterização. As sugestões do colega e amigo foram essenciais no desenvolvimento desta etapa do trabalho.

À equipe da secretaria do PGETEMA pela atenção, disponibilidade e ajuda sempre que foi demandada.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS	6
ÍNDICE	7
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE QUADROS	14
LISTA DE TABELAS.....	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	19
RESUMO.....	21
ABSTRACT	22
1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES	30
2.1 Objetivos geral e específicos	30
2.2 Delimitações e contribuições.....	30
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1 Manufatura Aditiva (AM – Additive Manufacturing)	35
3.1.1 Tecnologias de AM.....	36
3.1.2 Processo de produção com AM	37
3.1.3 Descentralização da produção com AM	39
3.1.4 Simulação DES em AM	41
3.2 Desempenho ambiental em Manufatura Aditiva.....	46
3.2.1 Operação da tecnologia de AM	47
3.2.2 Cadeias de Suprimentos com AM	49
3.3 Avaliação do Ciclo de Vida.....	51
3.3.1 Definição de objetivo e escopo.....	53
3.3.2 Análise de Inventário e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	55
3.4 Oportunidades de pesquisa	57
3.4.1 Avaliação do ciclo de vida em AM	57
3.4.2 Simulação DES integrada com LCA.....	60
3.4.3 Integração DES-LCA para análise de AM	62

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	63
4.1 Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo.....	66
4.2 Simulação do Sistema de Produção AM com DES	69
4.2.1 Coleta e Tratamento de Dados	70
4.2.2 Modelagem Conceitual	72
4.2.3 Modelagem Computacional	73
4.2.4 Simulação de Experimentos	75
4.3 Avaliação do desempenho ambiental com LCA.....	76
4.3.1 Análise de Inventário.....	77
4.3.2 Avaliação de Impacto.....	79
4.4 Integração dos Módulos DES e LCA	82
4.5 Avaliação do método proposto.....	82
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
5.1 Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo.....	86
5.1.1 Descrição do produto analisado e tecnologia de AM	87
5.1.2 Descrição dos processos analisados	90
5.1.3 Descrição das demandas e demandantes	96
5.1.4 Sistema de Produto e Unidade Funcional.....	99
5.1.5 Definição das categorias de impacto e indicadores	100
5.2 Simulação do Sistema de Produção AM	103
5.2.1 Coleta e tratamento de dados de produção e de transporte	103
5.2.1.1 Definição das distribuições de probabilidade.....	103
5.2.1.2 Coleta de dados para cálculo de consumo de energia.....	105
5.2.1.3 Clusterização dos demandantes.....	106
5.2.2 Modelagem Conceitual	110
5.2.3 Modelagem Computacional	110
5.2.4 Simulação dos Experimentos.....	115
5.3 Avaliação do desempenho ambiental	120
5.3.1 Análise de Inventário.....	120
5.3.2 Avaliação de Impacto.....	127
5.3.2.1 LCIA da operação do AM-HUB.....	129
5.3.2.2 Análises de sensibilidade e de incerteza dos resultados da LCIA da operação do AM-HUB	134

5.3.2.3 LCIA da distribuição do produto.....	139
5.3.2.4 Análises de sensibilidade e de incertezas dos resultados da LCIA da distribuição do produto	141
5.3.2.5 Comparação entre o AM-HUB e o AM-CLUSTER.....	143
5.4 Integração dos módulos DES e LCA.....	148
5.4.1 Modelagem das variáveis de entrada e saída no modelo DES-LCA	148
5.4.2 Simulação e análise de resultados para a etapa de produção.....	153
5.4.3 Simulação e análise de resultados para a etapa de distribuição	155
5.4.4 Análise do módulo DES-LCA.....	157
5.5 Avaliação do método proposto.....	158
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	162
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
8. APÊNDICES.....	191
APÊNDICE A - Revisões de Literatura.....	191
APÊNDICE B - Dados de demanda e atendimento do HUB.....	193
APÊNDICE C – Parâmetros do processo de entrega de matérias-primas e produtos acabados	195
APÊNDICE D – Dados de tempo de transporte de matérias-primas e produtos acabados.....	196
APÊNDICE E – Distribuições de probabilidade dos tempos de entrega de matérias-primas e tempos de entrega de produtos	197
APÊNDICE F – Dados de tempo de preparação e produção no HUB-AM	198
APÊNDICE G – Distribuições de probabilidade dos tempos de preparação e produção do HUB-AM	200
APÊNDICE H – Coordenadas das localizações dos demandantes de face shields	201
APÊNDICE I – Resultados do cenário de clusterização K=5.....	202
APÊNDICE J – Cenário de clusterização K = 5	203
APÊNDICE K – Parâmetros do processo de entrega de produtos acabados no cenário AM-CLUSTER (K=5).....	204
APÊNDICE L – Dados de tempo de transporte de face shields nos clusters (K=5) 205	

APÊNDICE M – Distribuições de probabilidade dos tempos de transporte do cenário AM-CLUSTER	206
APÊNDICE N – Modelo conceitual da configuração AM-HUB	207
APÊNDICE O – Modelo computacional da configuração AM-HUB	208
APÊNDICE P – Resultados dos cálculos de precisão para 10 e 40 replicações de simulação.....	209
APÊNDICE Q – Variabilidade nos resultados das replicações da simulação ..	211
APÊNDICE R – Resultados da validação do modelo computacional	213
APÊNDICE S – Programação computacional do modelo AM-HUB no software ProModel for Windows.....	229
APÊNDICE T – Cenários de simulação e resultados do LCIA para distribuição de face shields.....	234
APÊNDICE U – Programação computacional do modelo AM-HUB com indicadores de desempenho ambiental no software ProModel for Windows..	237
APÊNDICE V – Modelo computacional DES-LCA.....	241
APÊNDICE W – Amostra de dados, distribuição de probabilidade e histograma dos tempos de entrega de face shields na configuração AM-CLUSTER	242

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Escopo considerado no desenvolvimento do modelo DES-LCA.....	31
Figura 2.2. Configuração AM-HUB.....	33
Figura 2.3. Configuração AM-CLUSTER.....	33
Figura 3.1. Etapas da LCA.	53
Figura 4.1. Método de trabalho.	63
Figura 4.2. Proposta de método de desenvolvimento do modelo DES-LCA	65
Figura 4.3. Etapas do módulo de simulação computacional DES.....	69
Figura 4.4. Etapas de avaliação do ciclo de vida.	76
Figura 5.1. Fotos do produto	87
Figura 5.2. Fotos das peças impressas.....	88
Figura 5.3. Fluxo de planejamento, programação, produção e montagem.	91
Figura 5.4. Imagens do arquivo de impressão gerado no Simplify3D 4.0.	93
Figura 5.5. Mapa com o Hub de AM (vermelho) e locais de entrega (azuis) no raio de 30km.	91
Figura 5.6. Gráficos de consumo da máquina de corte em KWh.....	106
Figura 5.7. Gráficos de consumo da impressora referência em KWh.....	106
Figura 5.8. Mapa com plano cartesiano para definição das coordenadas dos demandantes.....	107
Figura 5.9. Mapa com distribuição dos demandantes no Estado do RS.....	108
Figura 5.10. Contribuição relativa das operações no LCIA-Recipe do AM-HUB (sem distribuição).....	130
Figura 5.11. Rede de fluxo com impacto relativo da categoria 'Aquecimento Global' no AM-HUB	131

Figura 5.12. Contribuição absoluta das operações nos resultados de CED do AM-HUB (sem distribuição)	132
Figura 5.13. Contribuição relativa das operações no LCIA-CED do AM-HUB (sem distribuição).....	132
Figura 5.14. Rede de fluxo com impacto relativo da soma de todos os recursos energéticos do CED no AM-HUB	133
Figura 5.15. Incerteza do resultado para a categoria 'Aquecimento global' no AM-HUB.....	138
Figura 5.16. Incerteza do resultado para a categoria 'Não renovável (fóssil)' no AM-HUB.....	138
Figura 5.17. Incerteza média e quartis da distribuição de probabilidade dos resultados do AM-HUB nas categorias do Recipe	138
Figura 5.18. Incerteza média e quartis da distribuição de probabilidade dos resultados do AM-HUB nas categorias do CED	139
Figura 5.19. Incerteza do resultado para a categoria 'Aquecimento global' na distribuição	142
Figura 5.20. Incerteza do resultado para a categoria 'Não renovável (fóssil)' na distribuição	142
Figura 5.21. Incerteza média e quartis da distribuição de probabilidade dos resultados nas categorias do Recipe para a distribuição	142
Figura 5.22. Incerteza média e quartis da distribuição de probabilidade dos resultados nas categorias do CED para a distribuição	143
Figura 5.23. Comparação do LCIA das configurações AM-HUB e AM-CLUSTER..	146
Figura 5.24. Contribuição do impacto ambiental da distribuição e da produção nas configurações	146
Figura 8.1. Localização dos centros dos Clusters para K=5.....	202
Figura 8.2. Modelo conceitual da configuração AM-HUB	207
Figura 8.3. Layout do modelo computacional do sistema AM-HUB	208

Figura 8.4. Resultados das 40 replicações para Tempo de ciclo da impressora tipo 1	211
Figura 8.5. Resultados das 40 replicações para Tempo de entrega de <i>face shields</i> entregues em demandantes localizados em até 30 km	212
Figura 8.6. Layout do modelo computacional DES-LCA	241
Figura 8.7. Distribuições de probabilidade testadas para tempos de entrega de <i>face shields</i> e histograma da amostra com distribuição de probabilidade Gama	242

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Métodos de quantificação de impacto ambiental.....	57
Quadro 5.1. Dimensões e informações sobre fornecimento	89
Quadro 5.2. Entidades, processamentos e equipamentos.....	92
Quadro 5.3. Indicadores ambientais e operacionais	102
Quadro 5.4. Agrupamentos para diferentes cenários de clusters.....	108
Quadro 5.5. Agrupamentos e produtores para K=5	109
Quadro 5.6. Verificação de inputs-outputs do modelo computacional.....	112
Quadro 5.7. Inventário de dados de entrada	123
Quadro 5.8. Inventário de dados de saída	124
Quadro 5.9. Equações para modelagem da variabilidade dos resultados no DES- LCA	150
Quadro 5.10. Equações ajustadas para modelagem dos resultados de transporte no DES-LCA.....	150
Quadro 5.11. Variáveis de entrada e saída do modelo DES-LCA – etapa distribuição	151
Quadro 5.12. Variáveis de entrada e saída do modelo DES-LCA – etapa produção.....	152
Quadro 8.1. Revisões de literatura sobre LCA-AM	191
Quadro 8.2. Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de matérias-primas.....	195
Quadro 8.3. Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de <i>face shields</i>	195
Quadro 8.4. Distribuições de probabilidade dos tempos de entrega	197

Quadro 8.5. Distribuições de probabilidade dos tempos de preparação e produção	200
Quadro 8.6. Coordenadas dos demandantes.....	201
Quadro 8.7. Clusters para K=5.....	202
Quadro 8.8. Distância dos produtores AM até demandantes dos cluster K=5	203
Quadro 8.9. Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de <i>face shields</i>	204
Quadro 8.10. Distribuições de probabilidade dos tempos de transporte (AM-CLUSTER)	206
Quadro 8.11. Cenários com distâncias entre demandantes e centros de produção para as duas configurações (centralizada e descentralizada).....	234

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Impressoras e dimensões de impressão.	89
Tabela 5.2. Tempos de ciclo e frequência das atividades operacionais de produção de <i>face shields</i>	96
Tabela 5.3. Dados agregados de demanda, pedidos e distância entre o <i>hub</i> e o demandante.	97
Tabela 5.4. Dados agregados de entregas mensais por tipo de demandante	99
Tabela 5.5. Demandas e entregas mensais.....	111
Tabela 5.6. Intervalo da média da diferença entre os resultados da simulação e os resultados reais para as variáveis consideradas na validação do modelo computacional	115
Tabela 5.7. Equipamentos, demanda total de <i>face shields</i> e demandantes por cluster	116
Tabela 5.8. Demandas e entregas mensais do cluster 2	117
Tabela 5.9. Demandas e entregas mensais do cluster 4'.....	117
Tabela 5.10. Utilização das impressoras nas diferentes configurações	118
Tabela 5.11. Resultados de tempo de entrega de <i>face shield</i> dos cenários AM-HUB e AM-CLUSTER.....	119
Tabela 5.12. Fluxos de entrada e saída do AM-HUB	127
Tabela 5.13. Resultados do método Recipe para o AM-HUB (sem distribuição)	130
Tabela 5.14. Resultados do método CED para o AM-HUB (sem distribuição).....	132
Tabela 5.15. Análise de sensibilidade da redução dos valores de entrada.....	135
Tabela 5.16. Análise de sensibilidade do aumento dos valores de entrada.....	136
Tabela 5.17. Resultados da análise de incertezas para os resultados do AM-HUB.....	139

Tabela 5.18. Resultados de LCIA para as duas configurações de distribuição	140
Tabela 5.19. Resultados da análise de incertezas para os resultados de distribuição	143
Tabela 5.20. Resultados ajustados de LCIA para o AM-HUB (sem distribuição)....	144
Tabela 5.21. Resultados finais de LCIA para o AM-HUB e o AM-CLUSTER.....	145
Tabela 5.22. Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de produção	153
Tabela 5.23. Resultados da análise de sensibilidade para 10 replicações do modelo DES-LCA.....	154
Tabela 5.24. Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de distribuição AM-HUB	155
Tabela 5.25. Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de distribuição AM-CLUSTER.....	156
Tabela 5.26. Comparação dos resultados do AM-HUB e AM-CLUSTER – etapa de distribuição	157
Tabela 8.1. Dados de demanda e lead time de entrega para distribuição	193
Tabela 8.2. Dados de tempos de entrega das matérias-primas e de entregas de <i>face shields</i>	196
Tabela 8.3. Amostras de tempos das operações de preparação e produção	198
Tabela 8.4. Dados de tempos de entrega de <i>face shields</i> nos clusters	205
Tabela 8.5. Precisões obtidas no modelo de simulação para 10 replicações	209
Tabela 8.6. Precisões obtidas no modelo de simulação para 40 replicações	210
Tabela 8.7. Validação do modelo para a variável ‘Tempo de entrega de PLA’	213
Tabela 8.8. Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de PETG’	214
Tabela 8.9. Validação do modelo para ‘Tempo de Entrega de Fita Elástica’	215

Tabela 8.10. Validação do modelo para ‘Tempo da impressora tipo 1 em <i>stand-by</i> ’	216
Tabela 8.11. Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da impressora tipo 1’	217
Tabela 8.12. Validação do modelo para ‘Tempo da impressora tipo 2 em <i>stand-by</i> ’	218
Tabela 8.13. Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da impressora tipo 2’	219
Tabela 8.14. Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da Corte Laser’	220
Tabela 8.15. Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo de Montagem’	221
Tabela 8.16. Validação do modelo para ‘Quantidade de <i>face shields</i> montadas’ ...	222
Tabela 8.17. Validação do modelo para ‘Quantidade de <i>face shields</i> entregues no Campus Central’	223
Tabela 8.18. Validação do modelo para ‘Quantidade de <i>face shields</i> entregues em demandantes localizados em até 30 km’	224
Tabela 8.19. Validação do modelo para ‘Quantidade de <i>face shields</i> entregues em demandantes localizados acima de 30 km’	225
Tabela 8.20. Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de <i>face shields</i> entregues no Campus Central’	226
Tabela 8.21. Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de <i>face shields</i> entregues em demandantes localizados em até 30 km’	227
Tabela 8.22. Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de <i>face shields</i> entregues em demandantes localizados acima de 30 km’	228
Tabela 8.23. Resultados da LCIA para a distribuição na configuração AM-HUB	235
Tabela 8.24. Resultados da LCIA para a distribuição na configuração AM-CLUSTER	236
Tabela 8.25. Amostra de dados de distância e tempo utilizados para definição da distribuição de probabilidade dos tempos de entrega na configuração AM-CLUSTER	242

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Simulação baseada em agentes (do inglês <i>Agent-Based Simulation</i>)
ABS*	Acrilonitrila butadieno estireno (do inglês <i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>)
ADP	Potencial de depleção abiótica (do inglês <i>Abiotic depletion potential</i>)
AM	Manufatura Aditiva (do inglês <i>Additive Manufacturing</i>)
AP	Acidificação potencial (do inglês <i>Acidification potential</i>)
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (do inglês <i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (do inglês <i>Computer-Aided Design</i>)
CED	Demanda de Energia Acumulada (do inglês <i>Cumulative Energy Demand</i>)
CO ₂	Dióxido de carbono
COVID	Doença do coronavírus (do inglês <i>Corona virus disease</i>)
DES	Simulação de Eventos Discretos (do inglês <i>Discrete Event Simulation</i>)
DLP	Processamento Digital de Luz (do inglês <i>Digital Light Processing</i>)
DMD	Deposição Direta de Metal (do inglês <i>Direct Metal Deposition</i>)
DMLD	Deposição Direta de Metal a Laser (do inglês <i>Direct Metal Laser Deposition</i>)
EBM	Fusão em Leito de Pó por Feixe de Elétrons (do inglês <i>Electron Beam based Powder Bed Fusion</i>)
EP	Potencial de eutrofização (do inglês <i>Eutrophication potential</i>)
ESG	Questões ambientais, sociais e de governança (do inglês <i>Environmental, Social and Governance</i>)
FDM	Modelagem por Deposição Fundida (do inglês <i>Fused Deposition Modeling</i>)
GWP	Potencial de Aquecimento Global (do inglês <i>Global Warming Potential</i>)
IDEF-SIM	Métodos de Definição Integrada - Simulação (do inglês <i>Integrated Definition Methods – Simulation</i>)
IoT	Internet das Coisas (do inglês <i>Internet of Things</i>)
ISO	Organização Internacional para Padronização (do inglês <i>International Organization for Standardization</i>)
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês <i>Life Cycle Assessment</i>)
LCI	Análise de inventário do ciclo de vida (do inglês <i>Life Cycle Inventory</i>)
LCIA	Avaliação do impacto do ciclo de vida (do inglês <i>Life Cycle Impact Assessment</i>)
LENS	Modelagem de Rede por Laser Projetado (do inglês <i>Laser Engineered Net Shaping</i>)
LMD	Deposição de Metal a Laser (do inglês <i>Laser Metal Deposition</i>)
LOM	Fabricação de Objetos Laminados (do inglês <i>Laminated Object Manufacturing</i>)

ODP	Potencial de depleção da camada de ozônio (do inglês <i>ozone depletion potential</i>)
ONU	Organização das Nações Unidas
PETG	Polietileno tereftalato glicol (do inglês <i>Polyethylene Terephthalate Glycol-modified</i>)
PLA	Ácido polilático (do inglês <i>Polylactic Acid</i>)
SD	Dinâmica de Sistemas (do inglês <i>System Dynamics</i>)
SLA	Estereolitografia (do inglês <i>Stereolithography</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a Laser (do inglês <i>Selective Laser Sintering</i>)
SLM	Fusão Seletiva a Laser (do inglês <i>Selective Laser Melting</i>)
VOC	Composto orgânico volátil (do inglês <i>Volatile Organic Compound</i>)

RESUMO

DE OLIVEIRA LEMOS, Fernando. **Avaliação do desempenho ambiental de sistemas de produção centralizada e descentralizada com Manufatura Aditiva: desenvolvimento de um *framework* para implementação de um modelo híbrido de Simulação de Eventos Discretos e Avaliação do Ciclo de Vida.** Porto Alegre, 2024. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O presente estudo abordou uma tecnologia com grande potencial de impacto no desempenho ambiental de Sistemas de Produção: a Manufatura Aditiva (do inglês, *Additive Manufacturing* - AM). A identificação de oportunidades de pesquisas sobre a avaliação do desempenho ambiental de processos aditivos a partir da aplicação de modelos computacionais híbridos, integrando Simulação de Eventos Discretos (do inglês, *Discrete Event Simulation* - DES) e Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês, *Life Cycle Assessment* - LCA), motivou a proposta de Tese. O estudo respondeu à questão de pesquisa: como integrar Modelos DES e LCA para avaliação do desempenho ambiental em sistemas de produção com Manufatura Aditiva? Foi proposto um *framework* para desenvolvimento de um modelo híbrido DES-LCA, o qual foi aplicado para identificar e avaliar fatores críticos ambientais em um estudo de caso sobre produção centralizada e descentralizada. O modelo gerou resultados que refletem a variabilidade do tempo das operações, do consumo de energia e do tempo de transporte nos indicadores de emissões de CO₂, Demanda de Energia Acumulada e Aquecimento Global, permitindo uma visão dinâmica do sistema avaliado se comparados com os resultados do modelo LCA. Os resultados obtidos de reduções nos indicadores (entre 74,05 e 75,26%), com a mudança do AM-HUB para o AM-CLUSTER, indicam um efeito positivo com a descentralização. O modelo DES-LCA permitiu avaliar *trade-offs* de uso de diferentes configurações de um sistema e avaliar a sensibilidade dos resultados em relação a mudanças em parâmetros críticos. O *framework* proposto poderá ser utilizado em estudos que visem o desenvolvimento de modelos DES-LCA, orientando e apoiando a estruturação e validação de modelos, a coleta de dados, a geração de resultados e a análise de cenários alternativos.

Palavras-chave: Desempenho Ambiental; Simulação de Eventos Discretos; Avaliação do Ciclo de Vida; Produção Centralizada; Produção Descentralizada.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA LEMOS, Fernando. **Environmental performance assessment of centralized and decentralized production systems with Additive Manufacturing: development of a framework for implementing a hybrid model of Discrete Event Simulation and Life Cycle Assessment.** Porto Alegre. 2024. PhD Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The present study addressed a technology with great potential for impact on the environmental performance of Production Systems: Additive Manufacturing (AM). The identification of research opportunities on the assessment of the environmental performance of additive processes based on the application of hybrid computational models, integrating Discrete Event Simulation (DES) and Life Cycle Assessment (Life Cycle Assessment - LCA), motivated the Thesis proposal. The study answered the research question: how to integrate DES and LCA models to evaluate environmental performance in production systems with Additive Manufacturing? It was a proposed framework for developing a hybrid DES-LCA model, which was applied to identify and evaluate critical environmental factors in a case study on centralized and decentralized production. The model generated results that reflect the variability of operations time, energy consumption and transportation time in indicators of CO₂ emissions, Accumulated Energy Demand and Global Warming, allowing a dynamic view of the system evaluated when compared with the results of the LCA model. The results obtained from reductions in indicators (between 74.05 and 75.26%), with the change from AM-HUB to AM-CLUSTER, indicate a positive effect with decentralization. The DES-LCA model allowed evaluating trade-offs in the use of different system configurations and evaluating the sensitivity of results in relation to changes in critical parameters. The proposed framework can be used in studies aimed at developing DES-LCA models, guiding and supporting the structuring and validation of models, data collection, generation of results and analysis of alternative scenarios

Keywords: Environmental Performance; Discrete Event Simulation; Life Cycle Assessment; Centralized Production; Decentralized Production.

1. INTRODUÇÃO

Dentro de um ambiente dinâmico de consumo e manufatura em constante mudança, o cenário atual dos processos produtivos é caracterizado por uma nova economia com foco em sustentabilidade dentro de um conceito multidimensional, incluindo aspectos ambientais, econômicos e sociais (RANJBARI et al., 2021). Nesse sentido, uma manufatura sustentável deve priorizar o desempenho dos seus processos em termos dos aspectos citados.

A busca pelo desenvolvimento sustentável dos processos industriais direciona o uso de estratégias que integrem desenvolvimento econômico, proteção e reputação ambiental, governança corporativa, riscos e justiça social, atendendo os fundamentos de ESG (do inglês, *Environmental, Social and Governance* - Questões ambientais, sociais e de governança) (ROY et al., 2020; DMUCHOWSKI et al., 2023; WAN et al. 2023). Estratégias para sustentabilidade devem ser utilizadas no apoio à formulação de políticas públicas e empresariais para o meio ambiente, a economia, a sociedade e a inovação tecnológica (MANI et al, 2014; OROS DARABAN et al., 2019).

A sustentabilidade também é pauta prioritária da ONU (Organização das Nações Unidas), a qual propõe objetivos para o desenvolvimento sustentável das nações. Esses objetivos impactam diretamente em como os processos de manufatura devem ser projetados e controlados. Dois objetivos em especial exemplificam a importância dos Sistemas de Produção na sustentabilidade das nações: garantir padrões sustentáveis de consumo e produção; e tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos (UNITED NATIONS, 2023). A sustentabilidade das nações, das empresas e dos processos produtivos depende da continuidade das operações com alto nível de serviço e baixo impacto ambiental.

O aspecto ambiental da sustentabilidade é muito explorado em Sistemas de Produção. O setor industrial responde por uma parcela significativa do consumo de energia e em emissões de dióxido de carbono (CO₂), o que gera atenção global sobre o seu impacto em questões energéticas e ambientais (GARWOOD et al., 2018). Isso

exige sustentabilidade baseada em ecoeficiência, ou seja, uma maior eficiência nos processos, conservação de energia e de recursos naturais, utilização de fontes de energia renovável, reduções na geração de resíduos e nas emissões de CO₂, políticas *eco-friendly* e segurança para funcionários, comunidades e consumidores (MANI et al., 2014; SPROEDT et al., 2015; LIEDER e RASHID, 2016).

Uma tecnologia com grande potencial de impacto na sustentabilidade de Sistemas de Produção e de Cadeias de Suprimentos, em especial na perspectiva ambiental, é a Manufatura Aditiva (do inglês, *Additive Manufacturing* - AM) (CHADHA et al., 2022). A AM é utilizada em cenários de produção sob demanda ou de customização em massa, que buscam atender a demanda por uma alta variedade de produtos e uma maior flexibilidade em processos de planejamento, programação e otimização da produção e da distribuição (WANG et al., 2017).

A AM é a evolução da prototipagem rápida para a fabricação rápida sob demanda, sendo uma alternativa aos processos tradicionais de fabricação subtrativa – baseada em remoção de material – (ISO/ASTM 52900, 2015), ou uma tecnologia que pode ser integrada para complementar os processos subtrativos tradicionais (FORD e DESPEISSE, 2016). A expectativa por um menor consumo de energia, de combustíveis e/ou de matérias-primas e fluidos, redução na emissão de CO₂ e um baixo impacto ambiental, em todas as fases do ciclo de vida do produto, orientam a escolha pelo uso de AM de forma isolada ou de forma integrada com outras operações (GEBLER et al., 2014; HUANG et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; TANG et al.; 2016; PRIARONE e INGARAO, 2017; GARCIA et al., 2018; CHADHA et al., 2022).

Melhorias nas gestões de projeto (redesenho do produto e componentes com foco na simplificação), de produção, de suprimentos, de armazenagem, de transporte, de distribuição e no uso dos produtos e das matérias-primas necessárias, permitem que sistemas com AM alcancem um desempenho sustentável nos aspectos ambiental, operacional e econômico (FORD e DESPEISSE, 2016). A utilização da tecnologia abordada potencializa a eficiência no consumo dos materiais e de energia no processo de produção, pois reduz, em contextos específicos: (i) os tempos entre o projeto e a produção, (ii) os tempos de produção e (iii) os tempos de entregas. Isso acaba reduzindo os impactos ambientais no ciclo de vida de produtos e de processos que utilizam a AM (HUANG et al., 2015; PENG et al., 2018).

Outro benefício da AM é a fabricação local sob demanda, ou seja, Cadeias de Suprimentos mais descentralizadas com manufatura distribuída. A tecnologia aditiva

permite que os itens possam ser produzidos no ponto de uso ou próximo dele, o que: melhora a flexibilidade e a capacidade de resposta às demandas do mercado; reduzindo os desperdícios e os custos de transportes, de fabricação e de estoques, incluindo produtos não vendidos e obsoletos (CHEN et al., 2015; CERDAS et al., 2017a; DESPEISSE et al., 2017). A produção próxima ao cliente (ponto de uso) permite o aumento de resiliência da Cadeia de Suprimentos, o atendimento de ciclos de produção mais curtos, a redução do *lead time* de entrega, a redução de consumo de energia, a redução do impacto ambiental na distribuição de itens e a mitigação de riscos de falhas de abastecimento (PENG et al., 2018).

A descentralização a partir da organização de processos aditivos em *hubs* de serviços é uma opção avaliada na literatura sobre AM, pois potencializa a eficiência do sistema produtivo a partir de um melhor aproveitamento da capacidade disponível das máquinas de AM (KHAJAVI et al., 2014; TOFAIL et al., 2018; SON et al., 2021). A localização dos *hubs* próximos dos clientes tende a reduzir os custos/impactos nos transportes de produto final, mas a ocupação de capacidade produtiva deve ser bem gerenciada. Uma baixa utilização da capacidade instalada pode tornar o processo caro e neutralizar ou reduzir os benefícios de produção sob demanda que a AM permite (KHAJAVI et al., 2014).

Os benefícios citados estão levando as empresas a repensar onde e como elas conduzem suas atividades de fabricação. Com o uso de AM estão sendo obtidos avanços disruptivos em diferentes aplicações e indústrias, como a aeroespacial, a automotiva, a de energia nuclear, a de construção civil e a biomédica (GAO et al., 2015; HUANG et al., 2015; JOSHI e SHEIKH, 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; JARED et al., 2017; SAADE et al., 2020; TIAN et al., 2022).

Desta forma, os processos de AM vêm sendo apontados como uma opção para Cadeias de Suprimentos e Sistemas de Produção ambientalmente conscientes e sustentáveis, objetivando atender a crescente sensibilização em relação a melhorias que impactem positivamente nas questões ambientais, na mudança climática, na redução da pegada de carbono de processos e produtos e na implantação de estratégias de economia circular (GEBLER et al., 2014; FALUDI et al., 2015; HUANG et al., 2017; D'AMATO et al., 2019; COLORADO et al., 2022).

A AM também tem sido reconhecida como uma tecnologia importante para a competitividade e eficiência em cenários impactados por incertezas na demanda (ARBABIAN e WAGNER, 2020). Em cenários de ruptura de abastecimento, como o

gerado pela pandemia de COVID-19, a AM foi utilizada como uma estratégia de resiliência para fornecimento de alguns insumos básicos, a partir da descentralização de produção, para que algumas Cadeias de Suprimentos pudessem manter um nível de serviço mínimo. A AM foi utilizada na produção, por exemplo, de suprimentos para a área da saúde como protetores faciais e peças de ventiladores mecânicos, sendo uma tecnologia promotora de novos negócios, além de apoiar a manutenção, durante a pandemia, de negócios consolidados (COLORADO et al., 2022).

A utilização da AM em diferentes cenários/contextos acabou gerando desafios na implementação, operação e controle da tecnologia. Os desafios de pesquisa aparecem em diferentes campos de conhecimento como, por exemplo, padronização de materiais, produtos e tecnologias, confiabilidade da tecnologia, propriedade intelectual, produtividade, estabilidade do processo, consumo de energia, qualidade do produto, impactos ambientais e fornecimento de máquinas e insumos. Esses desafios acabam orientando as linhas de pesquisa no tema AM. Estudos sobre o tema em diferentes linhas de pesquisa ajudam a consolidar a área de AM e gerar embasamento científico para justificar a integração da AM em diferentes Sistemas de Produção (SAADE et al.; 2020).

Segundo Ribeiro et al. (2020), grande parte dos desafios indica a necessidade de estudos teóricos e aplicados sobre sustentabilidade para a validação da integração da tecnologia de AM nos processos industriais. Solaimani et al. (2021) destacam que o impacto da AM na sustentabilidade, em termos de minimização de resíduos e de maior eficiência no fluxo de processo, é uma direção potencial para pesquisas. Gao et al. (2015) e Ford e Despeisse (2016) destacam a necessidade de estudos constantes que apoiem a compreensão sobre como a implementação de diferentes Sistemas de Produção, baseados em tecnologias de AM, afetam o consumo geral de recursos e os impactos ambientais.

Segundo Yang et al. (2017a) e Oros Daraban et al. (2019), os estudos sobre o impacto ambiental das aplicações de AM geralmente abordam: comparações do impacto ambiental entre diferentes processos AM, ou de AM com processos convencionais; questões relacionadas a materiais; métodos de uso/reuso, reciclagem e/ou descarte; impactos do *design* na sustentabilidade; e aspectos operacionais que afetam a sustentabilidade. Estudos que avaliam o impacto ambiental da AM são desenvolvidos desde 1999, a partir do trabalho referencial de Luo et al. (1999).

Estudos de impacto ambiental em AM, que integram metodologias para a otimização do produto e do processo aditivo, desde a fase de projeto até a produção e/ou distribuição da peça produzida, potencializam ganhos na análise da sustentabilidade em relação ao consumo de material e energia (FORD e DESPEISSE, 2016; TANG et al., 2016; AGRAWAL e VINODH, 2019; LEE et al. 2023). Nesse contexto, o presente estudo aborda o desempenho ambiental da Manufatura Aditiva, com foco na avaliação dos impactos energéticos e ambientais, para fornecer uma interpretação dos efeitos de curto e/ou longo prazo do uso da AM dentro de uma perspectiva de ciclo de vida de itens impressos ou dos produtos que utilizam os itens produzidos por AM. Nesta perspectiva de análise da AM são considerados o consumo de recursos, a geração e/ou gestão de resíduos e o controle das emissões, apoiando os processos de tomada de decisão em relação à adoção e implementação da AM (PENG et al., 2018).

Ao avaliar o desempenho ambiental do processo de AM ou qualquer processo de fabricação, o procedimento ideal é considerar todo o ciclo de vida, ou seja, considerar as etapas fora dos limites do processo de fabricação do produto. O exame de uma perspectiva de ciclo de vida apoia as tomadas de decisões na indústria e permite identificar oportunidades para reduzir o consumo de energia, de água e de material nas etapas de: extração de matérias-primas; produção de materiais, insumos e equipamentos; projeto/concepção do produto final; preparação de material para processamento; fabricação; uso; reparo; e/ou de disposição/tratamento no fim de vida (ISO 14040, 2006; PENG et al., 2018).

A avaliação dos fluxos entre um produto ou processo e o meio ambiente, a partir de uma perspectiva de ciclo de vida, é uma abordagem coerente para quantificar impactos ambientais potenciais e fornecer orientações para ações de melhoria (SAADE et al.; 2020). A abordagem sistêmica de ciclo de vida, em estudos de análise de Sistemas de Produção com AM, permite abordar o ambiente complexo e competitivo que envolve um sistema real de produção, ou seja, considerando, além da análise da tecnologia, as implicações dos processos de fornecimento, produção e distribuição.

A avaliação dos impactos ambientais de AM nessa perspectiva pode ser realizada com a utilização de diferentes sistemáticas de avaliação, sendo uma das mais utilizadas, para AM, a Avaliação do Ciclo de Vida (do inglês, *Life Cycle Assessment* - LCA) (FALUDI et al., 2015; JIANG et al., 2017; PRIARONE e INGARAO,

2017; REJESKI et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019). A LCA é uma metodologia para medição e análise dos impactos ambientais e de emissões relacionadas ao consumo de energia e de materiais ao longo do ciclo de vida de um produto (ISO 14040, 2006).

A LCA fornece uma avaliação, instantânea e estática no tempo, das interações complexas de um Sistema de Produto, pois assume que os parâmetros de tempo são constantes e impede uma avaliação dinâmica e temporal do sistema considerado (LÖFGREN e TILLMAN, 2011; WANG et al., 2014; STIEL et al., 2016; CERDAS et al., 2017b; RÖDGER et al. 2021). A incorporação de efeitos dependentes do tempo permite considerar a variabilidade nos resultados das etapas de avaliação do ciclo de vida de um produto e na análise da severidade dos impactos ambientais, apoiando tomadas de decisão mais acuradas (WANG et al., 2014; RAHN et al., 2023).

O comportamento dinâmico e estocástico dos fluxos de materiais e de informações, durante o ciclo de vida de um produto produzido com AM, pode ser avaliado a partir do desenvolvimento de modelos de simulação computacional. De forma integrada com a LCA, a simulação captura a dinâmica das relações entre os processos envolvidos e o comportamento estocástico do sistema, gerando análises sistêmicas para experimentos de mudanças nas configurações e nos parâmetros dos processos (LÖFGREN e TILLMAN, 2011; WIDOK et al., 2012; RÖDGER et al. 2021; LYU et al., 2023). A partir dos benefícios citados, observa-se a potencialidade das ferramentas de simulação no fornecimento de dados, de informações e de um ambiente analítico para o estudo de aspectos ambientais e econômicos (GBEDEDO et al., 2018a).

Um dos métodos mais utilizados para simulação de Sistemas de Produção, dentro de uma perspectiva sistêmica, é a Simulação de Eventos Discretos (do inglês, *Discrete Event Simulation* - DES) (BANKS et al., 2001; TAKO; ROBINSON, 2012; KIM et al., 2015; AVVENTUROSO et al., 2017). Os modelos DES têm sido reconhecidos como uma abordagem para a simulação estocástica de sistemas produtivos ecoeficientes, com foco nos impactos do processo nas dimensões econômica e/ou ambiental (KERAMYDAS et al., 2017; SOLAIMANI et al., 2021; SULTAN et al., 2021; BUI-DUY et al., 2023; RAVICHANDRAN et al., 2023).

Por outro lado, Cerdas et al. (2017b) destacam que abordagens específicas para integrar DES com LCA (DES-LCA) são escassas. Stiel et al. (2016) realizaram um levantamento de estudos que abordam a integração e identificaram que estes

ficavam limitados ao cenário de uso e/ou ao objetivo de análise, o que indica que a integração DES-LCA é customizada em função do caso analisado.

A identificação de oportunidades de pesquisas que integrem sistemáticas de simulação de sistemas de produção com AM e de avaliação de desempenho ambiental com LCA, motivou a proposta de Tese, que busca responder à seguinte questão de pesquisa: como integrar Modelos DES e LCA para avaliação do desempenho ambiental em sistemas de produção com Manufatura Aditiva? Para responder à questão, foi proposto um *framework* para implementar um modelo híbrido de Simulação de Eventos Discretos e Avaliação do Ciclo de Vida (DES-LCA). Considerando a contextualização e a questão de pesquisa apresentadas, o presente estudo se fundamenta em uma perspectiva interdisciplinar, baseada em uma estrutura conceitual sobre a tecnologia abordada e no desempenho ambiental apoiado pela simulação computacional.

Para tanto, o trabalho foi estruturado em 6 capítulos, sendo que os 3 primeiros apoiam a definição do problema de pesquisa. No primeiro capítulo é apresentada a contextualização da AM no cenário atual de sustentabilidade, justificando a importância da pesquisa desenvolvida e apresentando a questão de pesquisa. No segundo capítulo são discriminados o objetivo geral, os objetivos específicos, as delimitações e as contribuições da pesquisa. No terceiro capítulo é estruturada e detalhada uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados nesta pesquisa. No quarto capítulo são detalhadas as etapas do método proposto e desenvolvido na Tese. No quinto capítulo são apresentados os resultados da aplicação do método em um estudo de caso e a discussão dos resultados. E o capítulo final apresenta as conclusões e considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida e o modelo de avaliação proposto e testado.

2. OBJETIVOS E DELIMITAÇÕES

2.1 Objetivos geral e específicos

Para responder à questão de pesquisa, foi definido como objetivo geral propor um método para avaliação do desempenho ambiental de sistemas de produção centralizada e descentralizada com AM. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver e implementar um *framework* de integração dos modelos DES e LCA;
- Aplicar e avaliar uma estratégia de avaliação de ciclo de vida do portão ao portão de sistemas com processos aditivos em diferentes configurações de produção – centralizada e descentralizada;
- Identificar as contribuições da integração dos modelos DES e LCA na avaliação do desempenho ambiental de um sistema; e
- Identificar oportunidades de melhorias no método proposto.

2.2 Delimitações e contribuições

O estudo tem como escopo uma análise da contribuição da integração da DES com a LCA nos resultados de desempenho ambiental de um sistema do portão ao portão, da entrega de matérias-primas para um processo aditivo até a entrega do produto nos usuários/demandantes. A Figura 2.1 representa o escopo analisado, destacando os principais fluxos na delimitação do ciclo de vida considerado. Desta forma, o estudo de LCA considera as seguintes etapas do ciclo de vida do produto: (i) os transportes entre os fornecedores de matérias-primas e o processo aditivo, (ii) a produção de peças pela AM e a montagem do produto e (iii) os transportes entre o produtor e os usuários do produto.

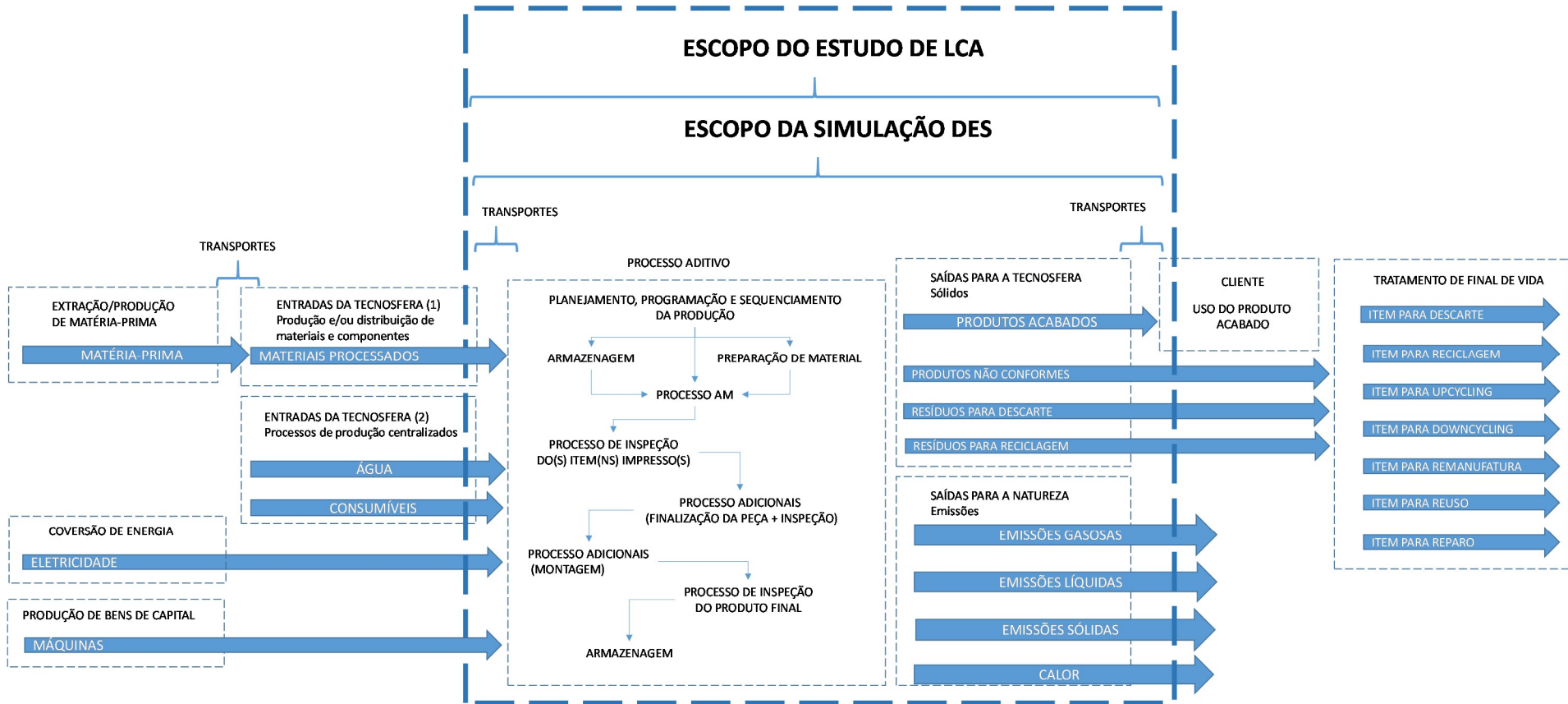


Figura 2.1 - Escopo considerado no desenvolvimento do modelo DES-LCA

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A utilização do produto final e o final de sua vida útil não são considerados neste estudo e, conseqüentemente, o desempenho ambiental do produto nas etapas de utilização e fim de vida do item analisado não foi englobado no estudo. Os processos produtivos a montante do processo aditivo também não foram considerados no estudo.

Destaca-se também que o estudo não abordou custos relacionados aos processos considerados no ciclo de vida ou tecnologias envolvidas. Análises de viabilidade econômica dos processos analisados, bem como o impacto social, não estão no escopo da pesquisa realizada.

A simulação computacional com DES foi delimitada para as etapas de fornecimento/recebimento de matérias-primas no processo aditivo, de manufatura do produto final e de entrega nos usuários. A DES é utilizada para quantificar e incorporar variabilidade nas entradas e saídas de materiais e de energia nas etapas de recebimento de materiais, fabricação de peças, montagem do produto final e distribuição do mesmo. Além disso, a DES permite disponibilizar dados e informações sobre o comportamento temporal do sistema analisado do portão ao portão estendido até a entrega do produto no cliente. Como o foco é no sistema de manufatura e na logística de entrega, a DES é indicada para a modelagem e simulação computacional do sistema.

No caso de simulação de um sistema que incorpore mais etapas a montante e/ou a jusante do sistema do portão ao portão, outras técnicas de simulação devem ser avaliadas como, por exemplo, a Dinâmica de Sistemas (do inglês, *System Dynamics* - SD) ou a Simulação baseada em Agentes (do inglês, *Agent-Based Simulation* - ABS) (TAKO; ROBINSON, 2012; LARREA-GALLEGOS et al., 2024; YU et al., 2024).

Na etapa de LCA é realizada a avaliação do impacto da tecnologia AM e dos processos de transporte de matérias-primas e produtos acabados a montante e a jusante do processo aditivo considerado, respectivamente. Com o uso da DES e da LCA, a pesquisa realizada permitirá avaliar restrições implícitas em relação aos fluxos de materiais, de energia e de resíduos/emissões. A aplicação do método busca identificar e avaliar fatores críticos e *trade-offs* ambientais entre os cenários de produção centralizada e descentralizada do estudo de caso. Os cenários avaliados se basearam nos estudos de Xu et al. (2021), Kerdlap et al. (2022) e Manco et al. (2023), mas adaptados para as possibilidades de configurações do estudo de caso: (i) um

com a centralização da produção e do fornecimento em um *hub* de AM (AM-HUB) - (Figura 2.2) - e (ii) outro com a descentralização da fabricação do produto final e com entrega de matérias-primas nos pontos de produção (AM-CLUSTER) que atendem um agrupamento de clientes (Figura 2.3).

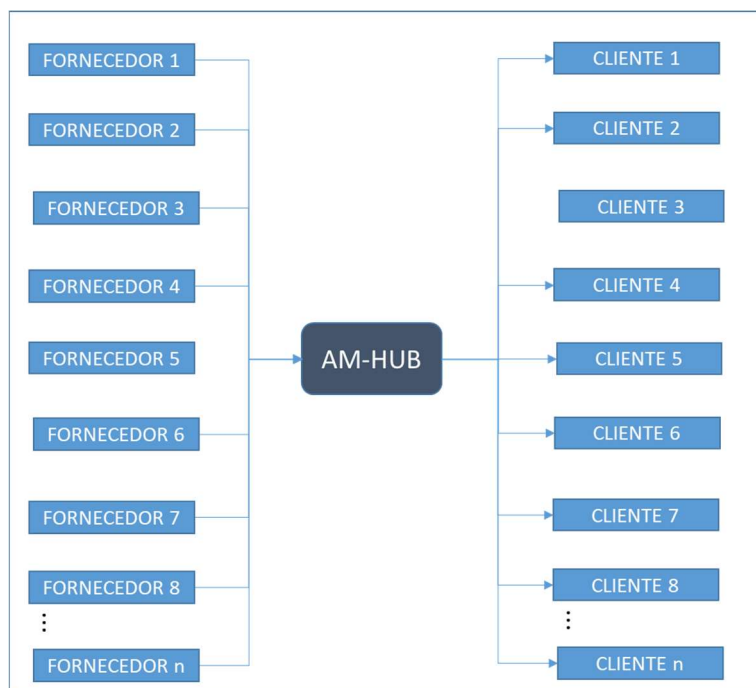


Figura 2.2 - Configuração AM-HUB

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

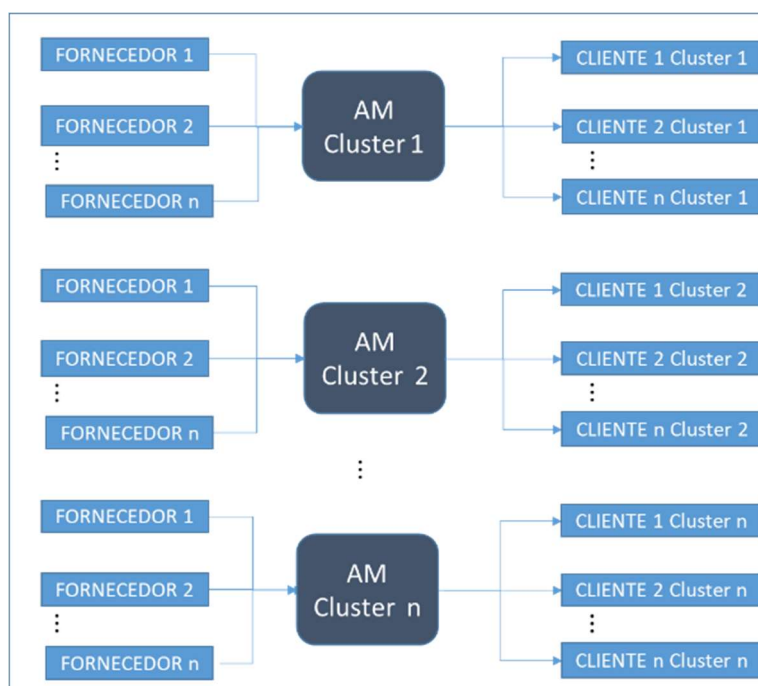


Figura 2.3 - Configuração AM-CLUSTER

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Nesse sentido, a Tese desenvolvida contribui na pesquisa sobre a integração DES-LCA, introduzindo novas considerações na tomada de decisão e modelagem ambiental da estrutura de sistemas com AM, mas se baseia fortemente em trabalhos anteriores na área. A proposta de tese e os resultados obtidos devem ser avaliados para aplicação em problemas e cenários diferentes, pois o contexto de aplicação pode resultar em diferentes conclusões.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo foi estruturada uma revisão de literatura sobre os temas AM, com ênfase em desempenho ambiental e LCA, destacando o método e aplicação em AM. Estudos apresentados na literatura recente, que justificam a necessidade e importância da presente pesquisa, também são apresentados. O capítulo foi subdividido nas seções: (i) Manufatura Aditiva, (ii) Desempenho Ambiental em Manufatura Aditiva e (iii) Avaliação do Ciclo de Vida.

3.1 Manufatura Aditiva (AM – *Additive Manufacturing*)

A AM é uma tecnologia utilizada em Sistemas de Produção de itens que demandam alto grau de customização ou personalização com baixo custo, de componentes e estruturas com geometrias complexas, composições heterogêneas e propriedades e funcionalidades avançadas de materiais (MELLOR et al., 2014; HUANG et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; JARED et al., 2017; KHORRAM et al., 2018). A funcionalidade de um objeto fabricado com AM é derivada da combinação da geometria e das propriedades do material utilizado e do objeto produzido (TOYSERKANI et al., 2021).

A AM possibilita a impressão de geometrias complexas, camada sobre camada, com controle de composição, microestrutura e, conseqüentemente, das funcionalidades dos itens produzidos, otimizando as propriedades mecânicas e estruturais dos mesmos (ASTM, 2013; HUANG et al., 2015; JARED et al., 2017). A capacidade de otimizar geometrias reduz desperdícios e a produção de resíduos, bem como reduz o consumo de material e energia (FORD e DESPEISSE, 2016). Nas próximas subseções são apresentadas as tecnologias de AM, os processos operacionais relacionados à um Sistema de Produção com AM e a aplicação da técnica de simulação DES em AM.

3.1.1 Tecnologias de AM

A AM cobre uma ampla gama de tecnologias de processos aditivos (FORD e DESPEISSE, 2016). A utilização da AM depende do processo aditivo de fabricação, do tipo de material e da técnica de fabricação convencional que será substituída ou com a qual a AM será integrada. Os processos aditivos podem ser categorizados a partir da técnica de fusão e deposição das camadas e da maneira como as camadas são conectadas e/ou pelo tipo de material utilizado para a manufatura (polímeros, metais, cerâmicas, compósitos ou materiais biológicos) (ASHOURPOUR e ZANONI, 2015; HUANG et al., 2015).

O estado inicial das matérias-primas - líquido, filamento, pasta ou pó, por exemplo – também pode impactar na escolha da tecnologia e na qualidade do item produzido (GUO e LEU, 2013). Os materiais utilizados nas matérias-primas em AM incluem poliamida (PA), acrilonitrila butadieno estireno (ABS*), ácido poliláctico (PLA), resina epóxi, aço inoxidável, alumínio, policarbonato, nylon, polietileno e ligas metálicas (KREIGER e PEARCE, 2013; LE BOURHIS et al., 2014; BURKHART e AURICH, 2015; HUANG et al., 2016; PENG, 2016; BEKKER e VERLINDEN, 2018; INGARAO et al., 2018; MA et al., 2018).

Existem vários processos de AM desenvolvidos e utilizados desde a década de 1980, que produzem itens físicos a partir de modelos virtuais como, por exemplo (HUANG et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; HU e MAHADEVAN, 2017; PRAKASH et al., 2018): Modelagem por Deposição Fundida (*Fused Deposition Modeling* - FDM); Estereolitografia (*Stereolithography* - SLA); Fabricação de Objetos Laminados (*Laminated Object Manufacturing* - LOM); Modelagem de Rede por Laser Projetado (*Laser Engineered Net Shaping* - LENS); Sinterização Seletiva a Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS); Fusão Seletiva a Laser (*Selective Laser Melting* - SLM); Deposição Direta de Metal (*Direct Metal Deposition* - DMD); Deposição Direta de Metal a Laser (*Direct Metal Laser Deposition* - DMLD); Processamento Digital de Luz (*Digital Light Processing* - DLP); Deposição de Metal a Laser (*Laser Metal Deposition* - LMD); e Fusão em Leito de Pó por Feixe de Elétrons (*Electron Beam based Powder Bed Fusion* - EBM).

A ASTM (do inglês, *American Society for Testing and Materials*) reconhece sete categorias de processos aditivos (ASTM, 2013): fotopolimerização, extrusão de material, jateamento de material, jateamento de aglutinante, fusão em leito de pó,

deposição por energia direcionada e laminação de folhas. Esses processos diferem entre si em termos das técnicas usadas para depositar camadas e nas formas pelas quais as camadas depositadas são unidas (HUANG et al., 2015). Detalhes sobre a classificação dos processos e as tecnologias podem ser obtidos em ASTM (2013), Chong et al. (2018), Eyers e Potter (2017), Toyserkani et al. (2021) e Huang et al. (2015). Esses estudos abordam materiais utilizados por cada processo, detalhes sobre o processo de impressão, fabricantes e modelos de máquinas em cada categoria.

De um modo geral, o tempo de construção em AM depende da velocidade de impressão, do tamanho da peça, da espessura da camada e da orientação da construção. Para cada tipo de tecnologia, o processo e velocidade de fabricação das camadas, a precisão e espessura da camada, o volume máximo de construção (câmara de construção), o material de impressão e a fonte de energia são diferentes, o que impacta nas propriedades e níveis de qualidade dos itens fabricados (GAO et al., 2015; HUANG et al., 2015; RANSIKARBUM et al., 2017). A decisão sobre a tecnologia deve considerar questões operacionais, econômicas e ambientais, além do entendimento das restrições atuais na utilização das tecnologias de AM.

3.1.2 Processo de produção com AM

Os componentes gerais de um sistema de produção com AM são os processos de: *design*, pré-processamento (planejamento da produção e preparação dos recursos necessários, como materiais e ferramentas), processamento (*setup*, aquecimento, fabricação e limpeza) e pós-processamento (acabamento, recuperação de material para reciclagem e inspeção de qualidade) (KIM et al., 2015; VDI 3405, 2014; EYERS e POTTER, 2017; LOH et al., 2018; PRAKASH et al., 2018). A *America Makes* e ANSI AMSC (2017) resumem o processo de produção de peças por AM nas seguintes etapas: (i) projeto do item, (ii) especificação dos materiais com os quais o item será construído, (iii) definição dos parâmetros de construção, (iv) construção e controle do processo, (v) realização de etapas de pós-processamento, (vi) teste final e (vii) certificação da peça para uso.

Na etapa de *design*, ou projeto, o item é projetado em modelos computacionais tridimensionais desenvolvidos em sistema CAD (do inglês, *Computer-Aided Design*) ou semelhantes, e depois é utilizado um *software* de preparação para dividir o modelo

CAD em camadas, sendo que a quantidade de camadas depende da resolução desejada (GAO et al., 2015; HUANG et al., 2015; ESMAELIAN et al., 2016; SINGH et al., 2017). A natureza digital da AM reduz os atrasos entre o projeto, a fabricação e a aplicação por meio do acesso direto aos modelos computacionais em bancos de dados de *designs* digitais (FORD e DESPEISSE, 2016; DESPEISSE et al., 2017). Além disso, a tecnologia de AM permite a fabricação dos itens em sua forma final ou quase final, com processamento adicional mínimo, o que resulta em vantagem competitiva de transferência mais rápida, do produto projetado, para o mercado (OROS DARABAN et al., 2019).

Após o projeto, o processo de produção dos itens tridimensionais é realizado por deposição, camada por camada, o que permite o controle da geometria do material em cada elemento discreto básico de volume (*voxel*), ou seja, o controle da microestrutura do material. Isso permite a redução do uso de materiais e a diminuição da massa do item produzido. Além disso, é possível produzir itens com diferentes materiais dentro de uma geometria única, o que gera capacidade multifuncional no item produzido (CAMPBELL et al., 2012; GAO et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; JARED et al., 2017) e, por exemplo, propriedades termomecânicas especialmente personalizadas (YUAN et al., 2021).

As propriedades do material são impactadas pela taxa de deposição de material na formação das camadas (HUANG et al., 2015). Uma resolução de camada mais alta, que significa uma menor espessura de camada, fornece um melhor acabamento de superfície, mas aumenta o tempo total de produção (GAO et al., 2015). As propriedades dos materiais e o desempenho do item produzido, incluindo resistência, ductilidade, tenacidade, tensão residual, precisão geométrica e estabilidade, também podem sofrer influência da taxa de deposição de material na formação das camadas, de deficiências de ligação entre camadas e de mudanças de geometria das peças (CAMPBELL et al., 2012; GAO et al., 2015; HUANG et al., 2015; JARED et al., 2017).

Variações na qualidade do produto de máquina para máquina e entre lotes de produção, e falta de compreensão do impacto das variáveis operacionais na qualidade da peça são desafios no uso de tecnologias AM (TOFAIL et al., 2018). A qualidade é definida a partir dos objetivos e funcionalidade do item e pode ser avaliada, por exemplo, pela resistência ao escoamento, fadiga, resistência à tração, rugosidade da superfície, % de alongamento, resistência ao impacto, taxa de encolhimento e microdureza (ZHOU et al., 2014).

O pós-processamento pode ser necessário em processos aditivos como, por exemplo, operações para melhorar a microestrutura, reduzir a porosidade, melhorar o acabamento das superfícies, reduzir a rugosidade e atender a precisão geométrica demandada (TADDESE et al., 2020). Dependendo do tipo de tecnologia AM, os objetos impressos demandam, por exemplo, a remoção de suportes de apoio à impressão salientes no objeto, processos de pós-cura e operações mecânicas, como polimento, lixamento e processos químicos de vapor para diminuir a rugosidade da superfície do objeto (ALI et al., 2019).

Na implementação de tecnologias AM há várias restrições e desafios como, por exemplo (KIM et al.; 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; FREITAS et al., 2016; JARED et al., 2017): o custo e a taxa de processamento; resolução mínima e tamanho máximo de fabricação; o desenvolvimento e padronização dos materiais utilizados; a repetibilidade e confiabilidade na fabricação; a validação de propriedades mecânicas e térmicas das peças; o acabamento superficial das peças; a sua precisão dimensional; um ambiente controlado, sem calor e umidade excessivos, tanto para a máquina quanto para a matéria-prima; e a necessidade de operações pós-processamento. Apesar dos desafios e restrições citadas, os processos aditivos fornecem inúmeras vantagens sobre as técnicas convencionais de fabricação e têm um grande potencial para melhorias no desempenho ambiental na indústria.

A redução esperada nos custos de transporte e de produção, no consumo de energia, nas emissões de gases de efeito estufa e nas emissões em equivalente de CO₂, deve-se às características do produto (materiais e complexidade), do processo aditivo de produção (quantidade e tipos de insumos, tempo de produção e resíduos gerados) e da possibilidade de otimização do *design* e da produção com foco na sustentabilidade ambiental (FORD e DESPEISSE, 2016; WATSON e TAMINGER, 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019).

3.1.3 Descentralização da produção com AM

Tecnologias de AM permitem otimizações nos processos logísticos, acarretando menores impactos ambientais finais devido à redução da complexidade logística e, conseqüentemente, das quantidades transportadas, das distâncias percorridas e dos estoques mantidos na Cadeia de Suprimentos (GAO et al., 2015; CERDAS et al., 2017a). Uma alternativa que é avaliada com a utilização da AM é a

descentralização da produção, ou seja, a fabricação perto do ponto de uso e sob demanda (de volumes baixos a médios).

A descentralização com AM reduz a complexidade da estrutura de Cadeias de Suprimentos, os estoques e os tempos de entrega (MANNERS-BELL e LYON, 2012; GAO et al., 2015; HUANG et al., 2015; BEN-NER e SIEMSEN, 2017; ARBABIAN e WAGNER, 2020). Kerdlap et al. (2022) e Rinaldi et al. (2022) citam que, em geral, a configuração de produção descentralizada tem melhor desempenho logístico do que a centralizada, em função de potencializar a flexibilidade com alto nível de serviço em cenários de variabilidade da demanda.

A utilização da AM para uma mudança de um sistema centralizado de fabricação para um descentralizado implica, além do aumento da responsividade, na redução do impacto ambiental do transporte (consumo de energia e emissões de CO₂) e no desenvolvimento de capacidade local de fornecimento (MOURTZIS et al., 2013; CHEN et al., 2015; CHADHA et al., 2022). Além de reduzir o consumo de energia e recursos, o modelo de descentralização com produção sob demanda também permite a interação direta entre consumidores e produtores locais de AM e/ou de insumos (GAO et al., 2015).

A descentralização da produção apoia uma estratégia de manufatura como serviço (*Manufacturing as a Service* - MaaS), na qual uma infraestrutura de manufatura em rede (com produtores independentes) está alinhada para produzir bens específicos (GHOBAKHLOO, 2018). Essa estratégia é viabilizada também pela organização de um banco de dados de projetos digital, que permite a produção sob demanda usando AM, reduzindo custos e impacto ambiental gerados pelo transporte (FORD e DESPEISSE, 2016).

A descentralização pode ser operacionalizada pelo fabricante do produto, que investe na integração da AM dentro de seus processos de produção, ou pela utilização de serviços terceirizados, provedores de AM, na fabricação de peças ou do produto, o que impacta na reconfiguração da Cadeia de Suprimentos. A terceirização viabiliza o acesso à tecnologia sem altos custos de investimento de capital e reduz as barreiras de entrada na utilização da AM, o que em fases de testes da tecnologia é uma opção atraente para as empresas. Além disso, a estratégia de terceirização pode gerar maior utilização das máquinas de AM quando o terceiro atende demandas de vários clientes, impactando positivamente na sustentabilidade (FORD e DESPEISSE, 2016; SON et al., 2021; RINALDI et al., 2022).

Tofail et al. (2018) relatam a necessidade de estudos que explorem o impacto da organização de *hubs* digitais de AM dentro das perspectivas de terceirização, de compartilhamento de capacidade produtiva, de maior utilização dos equipamentos e de redução de custos. Além disso, a AM permite que o consumidor assuma o papel de produtor, reduzindo perdas relativas ao consumo de materiais e otimizando os processos de customização (BAUMERS et al., 2017).

Conceitualmente, a descentralização sugere benefícios ambientais a partir da reconfiguração dos fluxos e interações entre elementos da Cadeia de Suprimentos, mas Kohtala e Hyysalo (2015) e Kerdlap et al. (2022) alertam para a necessidade de estudos para avaliação da eficiência da produção descentralizada com apoio de AM. Segundo Rinaldi et al. (2022), os benefícios da adoção de uma configuração descentralizada são muito limitados quando não há redução significativa da distância entre o fornecedor e o consumidor do item produzido e/ou quando a demanda média é muito baixa. Kerdlap et al. (2022) destacam que sistemas de produção distribuída podem gerar, dependendo da configuração de atendimento e da escala e produção, menor eficiência no consumo de recursos, de energia e água, bem como custos mais elevados por unidade de produção. Desta forma, estudos de comparação de desempenho econômico e ambiental de diferentes cenários de produção descentralizada com AM são fundamentais para auxiliar na tomada de decisão em relação à estratégia de produção e distribuição que deve ser implementada (MANCO et al., 2023).

3.1.4 Simulação DES em AM

A AM se apoia na Manufatura Digital para o desenvolvimento do projeto e/ou do processo de fabricação, utilizando diferentes metodologias integradas para reduzir o tempo e custo de desenvolvimento de produtos, atender demandas customizadas e garantir a qualidade e serviço demandados. Dentre as metodologias utilizadas podem ser citadas a modelagem e a simulação computacional (RÜBMANN et al., 2015; EYERS e POTTER, 2017; CHONG et al., 2018).

A simulação compreende um conjunto de ferramentas e métodos computacionais para a experimentação e validação de projetos e configurações de produtos, processos e sistemas (MOURTZIS et al., 2014). A simulação computacional de sistemas pode ser utilizada como um elemento-chave na tomada de decisão

gerencial, pois permite antecipar os resultados de estados futuros de fatores/variáveis e de hipóteses/decisões que influenciam o sistema analisado e agir proativamente. Os procedimentos de simulação permitem ainda analisar o potencial de resposta de um processo frente a cenários de instabilidade na demanda do produto ou serviço oferecido por este processo (KRAJEWSKI; RITZMAN, 2001).

A modelagem e simulação computacional é uma ferramenta que permite a tomada de decisão com base na simulação estocástica de diferentes cenários de comportamento de sistemas caracterizados por elevado número de variáveis, evitando experimentações e comprometimento de recursos no sistema real (BANKS et al., 2001; HARREL et al., 2002). De acordo com Law e Kelton (2000), as vantagens do uso da simulação computacional estão baseadas em: (i) capacidade de simulação de sistemas complexos (dotados de elementos estocásticos), os quais não são adequadamente descritos por modelos matemáticos analíticos, (ii) melhor controle sobre as condições experimentais do que seria possível com uma aplicação prática no sistema real, e (iii) análise de longos períodos de determinado processo em um tempo reduzido.

A questão central no estudo de modelos de simulação de processos de AM é apoiar à tomada de decisão em relação à definição e controle de parâmetros de processamento que afetarão a estrutura do item fabricado e, conseqüentemente, as propriedades do material e o desempenho do item (GAO et al., 2015; RODIC e KANDUC, 2015; YEBI e AYALEW, 2017). A simulação de processos de AM considera restrições de projeto e de processo de fabricação, caracterizados pelo tipo de material, categoria do processo de fabricação e modelos fenomenológicos que capturam interações multifísicas relevantes no processo analisado. As restrições em AM são, por exemplo, velocidades, acelerações, forças, momentos, cargas corporais, pressão de contato, centro de gravidade, temperatura, fluxo de calor e cargas térmicas transientes. Em alguns casos, dependendo do material, há a necessidade de algumas operações de pós-processamento para alcançar acabamento superficial aceitável, precisão dimensional e propriedades do material, sendo que isso deve ser levado em conta na modelagem do processo (JARED et al., 2017).

A simulação pode ser usada como ferramenta facilitadora para prever o comportamento de processos em AM e aliviar a necessidade de experimentos aleatórios extensivos para a definição de parâmetros operacionais. Para a proposição de um modelo de simulação de processos em AM é fundamental a identificação das

metodologias e abordagens aplicadas em pesquisas. Os estudos sobre simulação de processos de AM são desenvolvidos sob duas perspectivas, que não são mutuamente exclusivas, a operacional e a sistêmica (MELLOR et al., 2014).

Uma perspectiva sugere a análise da AM com uma visão da operação e da tecnologia de fabricação do item, e a outra se baseia em uma análise sistêmica, ou seja, a partir da análise do Sistema de Produção como um todo ou da Cadeia de Suprimentos na qual a AM está inserida. Na perspectiva sistêmica são avaliadas as operações de AM, os fluxos de materiais e de informações, os processos de *design*, de fabricação, de inspeção de qualidade, de suprimentos, de distribuição, mudanças organizacionais e vantagens competitivas, o que permite uma compreensão mais estratégica ou tática das aplicações e implicações da AM na indústria (CHAWLA et al., 2012; MELLOR et al., 2014; ZHOU et al., 2014; KIM et al., 2015; EYERS e POTTER, 2017; LOH et al., 2018).

A literatura indica que estudos de aplicação de modelos de simulação na perspectiva sistêmica devem ser estruturados a partir do desenvolvimento de sistemáticas computacionais que integrem *design*, produção, relações de processo-estrutura-propriedades e/ou avaliação do ciclo de vida dos componentes e produtos produzidos com AM (ZHOU et al., 2014; HUANG et al., 2015). Eyers e Potter (2017) identificaram uma lacuna na pesquisa de AM que está relacionada à ocorrência de poucas pesquisas sob uma perspectiva sistêmica, se comparadas com pesquisas que abordam a tecnologia e a operação da AM.

Uma técnica de simulação utilizada para avaliar a dinâmica de funcionamento, na perspectiva sistêmica, de Sistemas de Manufatura e Cadeias de Suprimentos com AM é a DES. A DES modela o sistema como um conjunto de entidades que são processadas conforme uma lógica programada com algoritmos e atributos. As entidades fluem pelo sistema modelado, interagindo entre si e/ou sendo processadas e/ou estocadas (em espera ou fila). O estado dos elementos (entidades, fluxos e recursos) do modelo muda a partir de eventos discretos que ocorrem estocasticamente em uma sequência de tempo (LAW e KELTON, 2000; TAKO e ROBINSON, 2012).

A aplicação da DES para análise de AM pode abordar de forma sistêmica o processo de produção no qual a tecnologia está inserida, considerando as operações antes do processo aditivo e as operações de distribuição e uso de um item (KIM et al., 2015). Uma pesquisa realizada em setembro de 2023, na base de dados WoS/SSCI,

sem restrições de períodos de publicação e com as palavras-chave "*discrete-event simulation*" e "*additive manufacturing*" (ou "*discrete-event simulation*" e "*3D printing*") resultou em 20 trabalhos, dos quais 14 foram publicados nos últimos 5 anos. A mesma pesquisa na base SCOPUS resultou em 19 trabalhos, dos quais 9 estudos se repetem nos dois levantamentos. A pesquisa nas bases de dados foi realizada com termos de buscas definidos pelo autor e foram considerados todos os tipos de documentos e todos os idiomas. A definição das bases de dados considerou critérios de relevância e representatividade das bases.

A quantidade de publicações DES-AM nos últimos 5 anos indica que os benefícios da DES na aplicação da avaliação do desempenho da AM estão sendo avaliados em pesquisas recentes. Destacam-se os estudos discriminados a seguir, que abordam: (i) a comparação da AM com outros sistemas produtivos ou estratégias de organização de Sistemas de Produção com AM, e (ii) a análise de Cadeias de Suprimentos com AM.

Nos trabalhos de Solaimani et al. (2021) e Cavalcante et al. (2019) são apresentados estudos de utilização da DES para quantificar e comparar a tecnologia AM com outro sistema de produção, permitindo a análise da variabilidade inerente em um ambiente dinâmico de flutuação no volume de produção e na diversidade da demanda de pedidos. Shakirov et al. (2020) modelaram um processo aditivo com DES para investigar o impacto de diferentes decisões de planejamento no desempenho operacional e econômico da AM. Avventuroso et al. (2017) desenvolveram um modelo DES para análise de tempos de *setup*, operação, manuseio, estocagem, inspeção de qualidade e consumo de matérias-primas em um sistema com apoio de AM.

Um modelo de eventos discretos para uma representação abstrata de um sistema com máquinas AM em paralelo foi proposto em Balta et al. (2018). Os autores buscavam maior controle sobre o sistema operacional para detectar anomalias e agilizar a tomada de decisões. Balta et al. (2019) expandiram o trabalho anterior para monitoramento de desempenho em tempo real e detecção de anomalias em processos AM de Modelagem por Deposição Fundida (FDM).

Kim et al. (2022a) demonstraram o impacto da complexidade de projeto de peças AM no desempenho do processo aditivo com a simulação de uma planta AM virtual para peças de aeronaves. Kim et al. (2022b) compararam o consumo de energia e a dinâmica de produção para diferentes estratégias de operação de uma planta virtual de AM, simulada com DES, com múltiplas máquinas. Hassan et al.

(2022) propuseram um método de simulação para realizar uma análise de *trade-off* entre custos de energia e tempo de ciclo a partir de combinações dos principais parâmetros de um processo AM.

Kamali et al. (2022) utilizaram DES para avaliar parâmetros de desempenho do processo de atendimento de uma clínica odontológica que usa AM para desenvolvimento e produção de itens para implantes e próteses. Também na área da saúde, Avventuroso et al. (2018) comprovaram a aplicabilidade da AM em um processo de uma produção em larga escala de dispositivos médicos. Os autores utilizaram DES para simular diferentes configurações de recursos e restrições em relação aos processos e à demanda, apoiando a tomada de decisões de planejamento e design, permitindo uma melhor escolha entre configurações alternativas.

Em relação aos estudos sobre o impacto da AM em Cadeias de Suprimentos, destaca-se o trabalho de Sun et al. (2020), que trabalharam com processos produtivos com impressora AM distribuídas em diferentes locais e com etapa centralizada de pós-processamento. Um modelo DES foi utilizado no nível de produção para apoiar o controle da operação e para gerar dados para análises preditivas. O modelo DES foi desenvolvido para gerar um dimensionamento adequado do sistema, regras de carregamento nas máquinas e decisões de sequenciamento nas etapas de produção.

Rinaldi et al. (2022) desenvolveram um modelo DES para reproduzir o comportamento dos componentes de uma Cadeia de Suprimentos e analisar diferentes configurações com AM. Zhang et al. (2019) utilizaram a DES para análise do impacto da AM em uma Cadeia de Suprimentos de peças de reposição sob demanda. Zijlstra et al. (2022) também avaliaram a dinâmica de abastecimento de peças de reposição para o Exército Real Holandês, considerando vários locais de impressão e vários tipos de máquinas AM em cenários simulados com DES. Moore et al. (2018) avaliaram os requisitos para que a AM seja integrada na Cadeia de Suprimentos do Exército dos EUA.

Estudos recentes de aplicação de DES para avaliação do processo aditivo da AM e/ou para uma avaliação mais ampla considerando a Cadeia de Suprimentos na qual a tecnologia está inserida, validam o desenvolvimento de estudos complementares para entendimento dos benefícios, das restrições e dos resultados possíveis gerados pela simulação computacional com a técnica específica de DES. Os estudos indicam a utilização da DES para análises na perspectiva sistêmica, considerando, se necessário, os impactos a montante e a jusante do processo aditivo.

3.2 Desempenho ambiental em Manufatura Aditiva

A definição de desempenho ambiental varia nas pesquisas existentes, pois interpretações específicas dependem da percepção do Sistema de Gestão Ambiental utilizado nas empresas e do seu papel na organização (NAWROCKA; PARKER, 2009). Apesar das diferentes definições possíveis, a série de normas ISO 14000 fornece uma definição geralmente aceita (JOHNSTONE, 2020). Segundo a ISO 14031 (2013), o desempenho ambiental é definido como os “resultados mensuráveis da gestão de uma organização dos seus aspectos ambientais”.

A AM impacta no desempenho ambiental a partir do aprimoramento da performance e qualidade de produtos, com grande potencial de aumento de eficiência em custos operacionais e de estoques, de redução de desperdício de materiais e matérias-primas, de redução de consumo de energia, de redução da emissão de CO₂ e de redução de tempos de operações e de entrega, ou seja, de eliminar e/ou minimizar restrições de projeto e produção existentes em técnicas tradicionais de síntese de materiais (GEBLER et al., 2014; HUANG et al., 2015; JARED et al., 2017; ISLAM, 2021).

A sustentabilidade de AM na dimensão ambiental se caracteriza por estudos que abordam o desempenho no consumo de energia, as fontes de energia utilizadas, as emissões de CO₂, a emissão de calor residual, o consumo da água, o impacto no solo, a otimização de projetos e os aspectos de avaliação do ciclo de vida (ULLAH et al., 2013; BURKHART e AURICH, 2015; CHEN et al., 2015; AGRAWAL e VINODH, 2019). A avaliação de desempenho ambiental deve ser tanto dos processos produtivos de materiais que servem como insumos da AM, quanto dos itens produzidos na AM (ULLAH et al., 2013; TADDESE et al., 2020).

Considerando as fases do ciclo de vida de um produto, na fase de início da vida são avaliados o projeto de produtos e de processos, a configuração do sistema de manufatura e o modelo de negócios. No meio da vida são avaliadas a eficiência na fase de uso e a extensão da vida útil do produto. E na fase de fim da vida são avaliados o fechamento do *looping* do ciclo de vida e o nível de economia circular aplicada ao item desenvolvido (descarte, reparo, reutilização, renovação, remanufatura e/ou reciclagem) (DESPEISSE et al., 2017).

O desempenho ambiental é gerenciado a partir de métricas (MOLDAN et al., 2012), que no caso da AM são, por exemplo: quantidade volumétrica de item

produzido; pegada de carbono; emissões de poluentes atmosféricos e de gases do efeito estufa; consumo de recursos da produção, de energia e água; eficiência energética; estoques de matérias-primas e produtos acabados; recuperação de valor no final da vida; uso de materiais renováveis; utilização de insumos perigosos; impacto devido ao transporte; e reciclagem de resíduos e/ou água. As métricas de desempenho utilizadas têm como objetivo identificar os principais fatores operacionais e logísticos de impacto ambiental em um processo de AM, permitindo direcionar as ações para tornar os sistemas produtivos mais sustentáveis.

Garcia et al. (2018), Yosofi et al. (2018), Agrawal e Vinodh (2019), Arrizubieta et al. (2020) e Ribeiro et al. (2020) destacaram, em seus estudos, que a maior parte das pesquisas sobre sustentabilidade em AM está direcionada para análises do consumo de materiais e de energia do processo produtivo. As análises são com foco: (i) no projeto dos produtos ou (ii) no Sistema de Produção e Distribuição na qual a AM está inserida.

O foco deste estudo foi no Sistema de Produção e Distribuição, mais especificamente nas operações de produção e de transporte. Desta forma, o projeto de produtos em AM não foi abordado. Para maiores detalhes sobre projeto em AM são indicados estudos em *Design for Additive Manufacturing* (ISO/ASTM 52910, 2018) e/ou em *Design for the Environment* (HAUSCHILD et al., 2004).

3.2.1 Operação da tecnologia de AM

As medidas de desempenho das operações de AM são influenciadas por seus parâmetros operacionais, sendo que o desempenho é frequentemente medido em termos de tempo de construção, qualidade do produto, propriedades mecânicas e tribológicas, precisão dimensional, custo de produção e energia consumida (RAO e RAI, 2016). O impacto ambiental das peças feitas com AM é altamente dependente do processo aditivo utilizado, do *design* da peça, da utilização da impressora e como é processada a entrada de material (FALUDI et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016).

Por exemplo, a direção em que a peça é colocada na plataforma da máquina direciona a acumulação das camadas, e é um fator que afeta diferentes critérios como tempo, custo, qualidade do item e impacto ambiental (RAO e RAI, 2016; ASADOLLAHI-YAZDI et al., 2017). A alta utilização da impressora AM, com impressão constante ou impressão de muitas peças de uma só vez, combinada com a escolha

dos materiais, também pode melhorar a eficiência energética e os impactos ambientais (SHI e FALUDI, 2020).

Em comparação com processos subtrativos, a ausência de lubrificantes e refrigerantes no processo de AM, a baixa quantidade ou nenhum refugo e a não utilização de moldes, impactam positivamente no desempenho ambiental (GEBLER et al., 2014; LE BOURHIS et al., 2014). Em geral, há pouco desperdício de material na AM. Quando há objetos impressos com material de suporte integrado (solúveis ou não solúveis), operações de pós-processamento são necessárias (GAO et al., 2015) e, em muitos casos, como por exemplo nos processos FDM, o suporte da peça impressa deve ser descartado (FORD e DESPEISSE, 2016). Em outros casos há possibilidade de reciclagem e reaproveitamento dos resíduos como, por exemplo, os gerados em processo à base de pó, que podem ser reciclados ou aproveitados em processos posteriores (HUANG et al., 2016).

O impacto da AM em questões ambientais e da saúde humana merece atenção, pois há lacunas nas pesquisas sobre avaliação do consumo de energia e de materiais, e sobre os possíveis perigos em relação à geração de resíduos, toxicidade dos materiais utilizados e emissão de partículas ultrafinas (STEPHENS et al., 2013; MENDES et al., 2017; PRIARONE e INGARAO, 2017; GARCIA et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019). A economia de material na AM pode ser parcialmente compensada pelo aumento da toxicidade relativa do material usado para AM e pelo impacto do uso de energia para produção da matéria-prima e do item manufaturado (FALUDI et al., 2015). Por exemplo, a temperatura do bocal de impressão com materiais ABS*, PLA e nylon, impacta na emissão de partículas de compostos orgânicos voláteis como estireno, ciclohexanona, butanol e etilbenzeno, que podem causar efeitos cardiovasculares e/ou respiratórios adversos (COLORADO et al., 2020).

Woodson (2016), Agrawal e Vinodh (2019) e Suárez e Domínguez (2020) destacam que estudos sobre a quantificação da toxicidade e desperdício de materiais e de energia, usados na AM, precisam ser mais explorados para apoiar a definição das soluções mais sustentáveis para processos e produtos. Entender os *trade-offs* entre toxicidade e consumo de materiais e de energia é fundamental para a tomada de decisão.

Faludi et al. (2015) concluíram, para a tecnologia de AM analisada no seu estudo, que o impacto ambiental medido com o uso de LCA tinha como principal fator

o consumo de energia. Ma et al. (2021) destacam que a identificação do consumo de energia do equipamento AM ainda demanda estudos, e que há espaço para o desenvolvimento de modelos quantitativos para análise do consumo de energia para diferentes processos AM. Nesse sentido, o consumo de energia é uma questão que merece atenção, pois a AM geralmente usa feixes (como feixes de laser, feixes de elétrons e plasmas) com alto consumo de energia para processar materiais (KREIGER e PEARCE, 2013; DA SILVA BARROS et al., 2017; YANG et al., 2017b; MA et al., 2021). O consumo de energia depende principalmente da área da superfície da peça, da sua complexidade e, conseqüentemente, do tempo de produção (DUNAWAY et al., 2017; GARCIA et al., 2018), o qual não é um requisito de vantagem na AM, quando comparado com processos de fabricação tradicionais, pois geralmente o tempo de produção por unidade é maior na AM.

As diferentes operações de processamento, pré-aquecimento, sistemas de alimentação, impressão, resfriamento, remoção de material e sistemas de controle consomem energia, o que demanda monitoramento sistêmico do consumo para a identificação do potencial de redução do impacto ambiental (FALUDI et al., 2015; WATSON e TAMINGER, 2018; GUTIÉRREZ-OSORIO et al., 2019). A energia consumida também deve ser avaliada durante o modo de espera e modo inativo de produção na AM (FALUDI et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016).

3.2.2 Cadeias de Suprimentos com AM

A sustentabilidade em Cadeias de Suprimentos é uma exigência cada vez maior por parte dos *stakeholders*, que demandam das empresas um maior desempenho ambiental, principalmente em relação à manufatura sustentável, emissões e conservação de recursos (GENOVESE et al., 2017; CUI et al., 2021). Sustentabilidade ambiental é vital ao projetar uma cadeia, o que exige a integração de estratégias ambientais com estratégias que permitam obter responsividade e/ou robustez para o atendimento da demanda (FRITZ, 2022; JOSHI, 2022).

A adoção da AM, integrada com outras tecnologias avançadas de manufatura, permite a estruturação de Cadeias de Suprimentos mais curtas, menores, mais localizadas, mais colaborativas, responsivas e sustentáveis (GEBLER et al., 2014; FORD e DESPEISSE, 2016; ZANONI et al., 2019; CUI et al., 2021). Ou seja, com menores *lead times* de entrega, com redução de estoques de matérias-primas,

componentes e produtos finais, com menores custos de transportes, com proximidade entre produtores e clientes, com compartilhamento de capacidade de fornecimento/produção e com modelos de distribuição inovadores em cenários de produção sob encomenda (CHAWLA et al., 2012; CHEN et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016; THOMAS, 2016; RIBEIRO et al, 2020; TADDESE et al., 2020; CUI et al., 2021).

A partir do redesenho de produtos e componentes, via AM, são gerados produtos mais simples e que requerem menos componentes, materiais e estágios de produção e transporte, impactando nos fluxos de materiais e no desempenho ambiental da Cadeia de Suprimentos (CHEN et al., 2015; MA et al., 2018). Além disso, a AM potencializa fornecedores locais, o que reduz *lead time* de entrega, custos de estoque e transporte, uso de energia e estoques de peças sobressalentes (ZANONI et al., 2019; DEN BOER et al., 2020).

Como a logística principal em AM é a distribuição de arquivos digitais e materiais básicos para a produção em centros de AM, há um grande potencial para melhorar o desempenho considerando a descarbonização de cadeia (SHARMA et al., 2022; ZHANG et al. 2022). A descarbonização busca a neutralidade de carbono, ou seja, emissões zero de CO₂ para prevenir o aquecimento global (CHEN, 2021). A estratégia de descarbonização pode ser apoiada por projetos de redes de produção e distribuição com AM que objetivem minimizar ou eliminar as emissões de CO₂ em algumas etapas da cadeia. As métricas relacionadas às emissões incluem o nível de emissões de CO₂ devido à produção, transportes e movimentações de materiais nas, ou entre unidades de produção e/ou de distribuição (KERAMYDAS et al., 2017).

O desempenho ambiental em AM deve considerar a Cadeia de Suprimentos na qual a AM está inserida. Nesta perspectiva são analisadas, de forma sistêmica, as etapas de produção de matérias-primas, do *design*, de produção, da utilização do item produzido, do final de sua vida, bem como as interações entre as etapas. Uma análise sistêmica aborda: a economia de materiais e de energia nos processos de produção; o redesenho do produto e do processo de produção; e a simplificação/reconfiguração da cadeia (CHEN et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016). Joshi (2022) destaca a necessidade de considerar, no projeto ou redesenho de cadeias, os impactos ambientais de emissões e consumo de água, de energia e de materiais.

Uma análise sistêmica completa considera as operações e recursos consumidos na extração de materiais, na produção (de matérias-primas, de insumos,

de componentes, de equipamentos e do produto), nos transportes realizados, na utilização dos produtos, nos serviços associados e no tratamento no fim da vida útil dos mesmos. A vida útil tem um impacto importante em análise de sustentabilidade, pois um produto com vida útil curta resulta em mais recursos gastos na reposição do item e na antecipação e maior frequência de operações de descarte, de reparo, de remanufatura ou de reciclagem do produto final e dos desperdícios gerados durante os processos produtivos (FORD e DESPEISSE, 2016; THOMAS, 2016).

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida

O desempenho ambiental de um processo é avaliado pelos impactos causados pelo processo analisado. De acordo com a ISO 14040 (2006), os impactos ambientais são classificados em danos potenciais ao meio ambiente natural, danos à saúde humana e consumo de recursos. Esses impactos são avaliados a partir de abordagens sistêmicas do processo analisado.

Uma avaliação do impacto e do desempenho ambiental da AM pode considerar a demanda de energia e de materiais em uma perspectiva sistêmica, e não somente no próprio processo de manufatura. Para uma análise sistêmica de consumo de recursos e de energia em AM são avaliados os processos de extração das matérias-primas e seu processamento antes do processo de manufatura do item analisado, o processo de manufatura em si, e o direcionamento do produto no final da sua vida útil para descarte, representando uma lógica de comportamento de consumo linear (fazer-usar-dispor), ou para reaproveitamento total ou parcial dentro uma lógica de Economia Circular (KOHTALA e HYYSAALO, 2015; LIEDER e RASHID, 2016; DESPEISSE et al., 2017; WATSON e TAMINGER, 2018).

Um método que tem sido utilizado para esse tipo de avaliação de processos aditivos ou de Cadeias de Suprimentos com AM é a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA - *Life Cycle Assessment*) (FALUDI et al., 2015; BAUMERS et al., 2017; JIANG et al., 2017; PRIARONE e INGARAO, 2017; REJESKI et al., 2018; STRONG et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019). A LCA é uma abordagem sistêmica para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou atividade, em um sistema real e ao longo do ciclo de vida do produto. Ou seja, permite avaliar as entradas, as saídas e os impactos ambientais potenciais de um Sistema de Produção nos processos de extração da matéria-prima, de transporte, de produção, de distribuição, de uso, de

reutilização, de manutenção, de reciclagem e de disposição final (ISO 14040, 2006; FORD e DESPEISSE, 2016; YANG et al., 2017a; COLORADO et al., 2020).

Os princípios e estrutura para LCA são definidos pela Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization - ISO*) dentro da série de normas internacionais ISO 14000. A ISO 14040 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) discrimina a estrutura, princípios e conceitos associados. A ISO 14044 (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*) apresenta a metodologia, orientações, requisitos e normatização da documentação (ISO 14040, 2006). Essas normas orientam a definição de políticas de longo prazo, a melhoria contínua da gestão ambiental, em instituições públicas e privadas, e a avaliação dos impactos ambientais de um produto do berço ao túmulo (GBEDEDU et al., 2018a).

Os impactos ambientais avaliados na LCA são relacionados aos consumos de energia e de materiais, caracterizados por impactos normalizados e ponderados que podem ser representados em CO₂ equivalente, por exemplo. Isso permite comparações entre processos a partir de métricas padronizadas de impacto ambiental (METEYER et al., 2014; FALUDI et al., 2015; LIU et al., 2018; WATSON e TAMINGER, 2018).

Para a aplicação da LCA podem ser utilizados modelos analíticos, baseados em simulação computacional e/ou modelos experimentais, validados por experimentos (OROS DARABAN et al., 2019). A LCA é geralmente realizada com apoio de *softwares*, pois a avaliação do ciclo de vida de produtos e serviços é um processo complexo. Os *softwares* permitem a modelagem e geração de relatórios de LCA a partir de bancos de dados com informações sobre os custos, o consumo de energia e o impacto ambiental da aquisição e/ou processamento dos itens do sistema de produção analisado. Exemplos de *softwares* são: (i) SimaPro (PARIS e MANDIL, 2017; AGRAWAL e VINODH, 2019; SHI e FALUDI, 2020; MANN et al., 2022), (ii) UMBERTO NXT LCA (METEYER et al., 2014; RAGAB et al., 2023) e (iii) GaBi (JAYAKRISHNA et al., 2017; KATEBI et al., 2023). Maiores detalhes desses *softwares* e de outros não citados podem ser obtidos em Su et al. (2020).

De acordo com a ISO 14040 (2006), a LCA é composta por quatro etapas operacionais e interativas (Figura 3.1): (i) Definição de objetivo e escopo; (ii) Análise de inventário do ciclo de vida (LCI - *Life Cycle Inventory*); (iii) Avaliação do impacto do

ciclo de vida (LCIA - *Life Cycle Impact Assessment*); e (iv) Interpretação do ciclo de vida, que ocorre após cada uma das etapas citadas anteriormente.

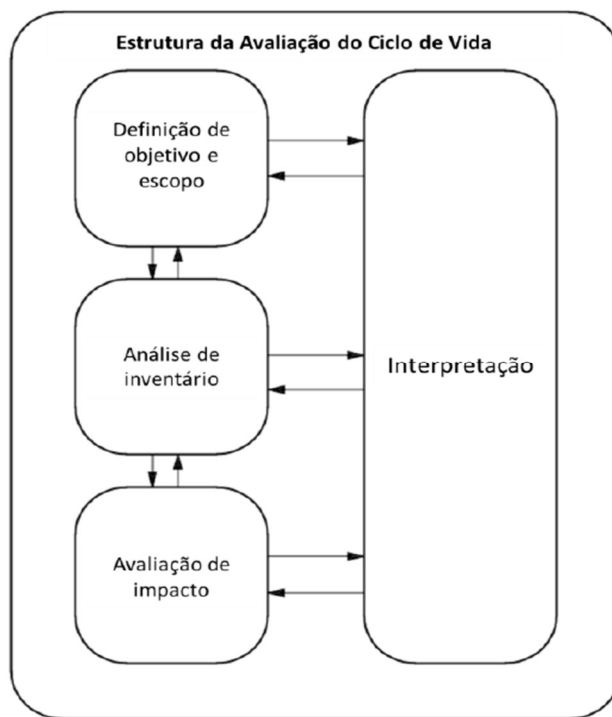


Figura 3.1 - Etapas da LCA

Fonte: ISO 14040 (2006)

A metodologia LCA é interativa, permitindo, por exemplo, a revisão de objetivos, escopo e categorias de impacto durante as etapas de 'Definição de objetivo e escopo', LCI e/ou LCIA. Na interpretação são avaliadas as informações dos resultados da 'Definição de objetivo e escopo', do inventário realizado e da avaliação de impacto resultante, o que pode direcionar mudanças em cada etapa e o aprimoramento do estudo, com mudanças no escopo, no inventário realizado e/ou nas categorias de impacto consideradas (MACIEL et al., 2019; RIBEIRO et al., 2020).

3.3.1 Definição de objetivo e escopo

O desenvolvimento da LCA demanda muitas escolhas e delimitações, o que exige fundamentação e justificativas científicas na construção do processo avaliativo (SAADE et al., 2020). Na etapa de 'Definição de objetivo e escopo' são definidos (ISO 14044, 2006): o sistema do produto e seus limites, a aplicação do estudo, o público-

alvo, as categorias de impacto, o procedimento de alocação, a unidade funcional e o fluxo de referência. O detalhamento de como definir os elementos citados é apresentado na seção 4.1 do capítulo de Procedimentos Metodológicos.

A aplicabilidade adequada dos resultados da LCA e a reprodutibilidade da avaliação estão limitadas ao contexto geográfico, temporal e tecnológico no qual foram modelados. A aplicação dos mesmos fora do contexto específico de análise gera incertezas nas conclusões sobre os resultados (ISO 14044, 2006; SAADE et al., 2020; RAHN et al., 2023).

É nesta etapa que são definidos o tipo e a qualidade da informação necessária para avaliar e quantificar a unidade de processo considerada no estudo, com base na definição das coberturas temporal, tecnológica e geográfica dos dados utilizados. A definição das fontes dos dados primários e secundários, dos dados da literatura utilizados e se serão considerados dados medidos, calculados ou estimados, impactam na qualidade e incerteza das informações de entrada do estudo e nos resultados (ISO 14044, 2006; SAADE et al., 2020).

A unidade de processo é a menor porção de um sistema de produto para a qual são coletados dados. O sistema do produto é caracterizado pelas unidades de processo, que executam uma ou mais funções específicas de produção ou serviço, conectadas pelos fluxos de energia e/ou de materiais e com geração de resíduos e emissões. Os limites de um sistema de produto caracterizam as interfaces do mesmo com o meio ambiente e/ou outros sistemas de produto (ISO 14044, 2006; CERDAS et al., 2017a).

Os limites na LCA podem ser definidos de 4 formas (ISO 14044, 2006): (i) do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*), que considera da extração de matérias-primas até o descarte final; (ii) do berço ao portão (*cradle-to-gate*), que pode considerar dois cenários, um da extração de matérias-primas até a entrada do processo de beneficiamento ou transformação da matéria-prima (portão de entrada), ou um cenário desde a extração da matéria-prima até a saída de um processo de beneficiamento/transformação (portão de saída); (iii) do portão ao portão (*gate-to-gate*), que considera da entrada no processo de beneficiamento/transformação até a saída, detalhando os processos unitários de produção; e (iv) do portão ao túmulo (*gate-to-grave*), que considera da saída do processo de produção do produto (portão de saída) até o descarte final.

Destaca-se que uma parte muito importante de um estudo de LCA é realizada na primeira etapa: a seleção das categorias de impacto ambiental e da metodologia de avaliação. A seleção é fundamental para a estruturação de uma avaliação sistêmica dos impactos ambientais, sendo possível sua revisão durante a aplicação da LCA. Exemplos de categorias de impacto são (MACIEL et al., 2019; VÝTISK et al., 2019; SHUAIB et al., 2021): Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* - GWP), Potencial de Toxicidade Humana (*Human Toxicity Potential* - HTP), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (*Ozone Depletion Potential* - ODP), Ecotoxicidade Aquática (*Freshwater Ecotoxicity*), Ecotoxicidade Marinha (*Marine Ecotoxicity*) Acidificação Potencial (*Acidification Potential* - AP), Potencial de Eutrofização (*Eutrophication Potential* - EP), Potencial de Depleção Abiótica (*Abiotic Depletion Potential* - ADP) e Demanda de Energia Acumulada (*Cumulative Energy Demand* – CED).

3.3.2 Análise de Inventário e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Na etapa de Análise de Inventário (*Life Cycle Inventory* - LCI) são mapeados e quantificados os fluxos de entrada (recursos, insumos, matérias-primas, energia), de processamento e saída (produtos, coprodutos, resíduos e emissões para o ar, água e solo), discriminando os dados ambientais (relacionados a material, energia, transporte, transformação, uso e resíduos) e as fases do produto consideradas no estudo (fabricação, montagem, desmontagem, destino final e/ou reutilização) (ISO 14044, 2006; JIANG et al., 2019; MACIEL et al., 2019). O mapeamento do fluxo que representa o ciclo de vida do produto analisado é fundamental na etapa de inventário (BRONDI e CARPANZANO, 2011), pois os consumos de material e energia dentro dos limites definidos no estudo influenciam na complexidade da quantificação do processo e na aquisição dos dados para o inventário (YI et al., 2020).

O inventário do ciclo de vida é o ponto crítico da aplicação da LCA, devido ao tempo necessário para a coleta de um inventário e à disponibilidade, ou não, de dados e informações em bancos de dados de LCI. A utilização de dados de produção e transporte de materiais, de consumo de energia e de gerenciamento de resíduos – disponibilizados em bancos de inventário e na literatura – deve ser complementada com a utilização de dados específicos das unidades de processos ou do sistema de

produto analisado (VALDIVIA et al., 2013; SPROEDT et al., 2015; GBEDEDO et al., 2016; SUH et al., 2016; BRUNDAGE et al., 2019; VÝTISK et al., 2019).

O produto da etapa de LCI é o perfil ambiental do sistema de produto analisado. O perfil é composto por um conjunto de dados que representa a quantidade de diferentes entradas (matérias-primas, insumos, energia) e de diferentes saídas e emissões para o meio ambiente (tóxicas e não tóxicas), e que são utilizadas como entrada da etapa de cálculo dos valores dos indicadores de categoria de impacto (SONNEMANN et al., 2004; VÝTISK et al., 2019).

Na etapa de Avaliação do Impacto (LCIA - *Life Cycle Impact Assessment*) é avaliada a magnitude e a importância dos impactos ambientais potenciais durante o ciclo de vida considerado para o produto analisado. Nesta etapa é realizada, a partir do perfil ambiental gerado no inventário, a caracterização, quantificação e avaliação em termos de saúde humana e ecossistema (AGRAWAL e VINODH, 2019; JIANG et al., 2019; ISLAM, 2021). A avaliação é estruturada em quatro etapas consecutivas: classificação, caracterização, normalização e ponderação. As etapas de LCI e LCIA estão detalhadas nas seções 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente.

A LCIA engloba os impactos dentro dos limites do sistema analisado, a unidade funcional de análise e a aplicação dos métodos de alocação dos impactos definidos na primeira etapa do método. O impacto ambiental pode ser classificado em impacto a montante (consumo de recursos) e impacto a jusante (emissões ambientais – atmosféricas e hídricas) (JIANG et al., 2019).

Na LCIA são utilizados métodos de quantificação de recursos e materiais consumidos e das emissões e resíduos. A utilização de diferentes métodos exige cuidados nas comparações dos resultados de estudos de avaliação de ciclo de vida (ROSENBAUM et al., 2018). Exemplos de métodos de quantificação são apresentados no Quadro 3.1.

Alguns dos métodos citados não têm mais suporte e atualizações, o que exige uma análise crítica na tomada de decisão pelo seu uso. A escolha do método de avaliação e das categorias de impacto é um processo que pode se tornar complexo em função da variedade de metodologias e categorias disponíveis nos *softwares* especialistas em LCA (YI et al., 2020).

Quadro 3.1 - Métodos de quantificação de impacto ambiental

Método	Estudos com aplicação do método	Método	Estudos com aplicação do método
Ecolíndice 95	Luo et al. (1999) Sreenivasan e Bourell (2009)	Ecolíndice V2.0	Kreiger e Peaece (2013) Garcia et al. (2018)
Ecolíndice 99	Le Bourhis et al. (2013) Burkhardt e Aurich (2015) Kerbrat et al. (2015)	ReCiPe	Faludi et al. (2015) Malsheet et al. (2015) Nagarajan et al. (2016) Bekker e Verlinden (2018) Ingarao et al. (2018) Ma et al. (2018) Shi e Faludi (2020)
IMPACT 2002+	Faludi et al. (2015) Da Silva Barros e Zwolinski (2016) Garcia et al. (2018)	CED	Kreiger e Peaece (2013) Kreiger et al. (2014) Paris et al. (2016)
CML	Výtisk et al. (2019)	EDIP	Potting e Hauschild (2006)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.4 Oportunidades de pesquisa

A identificação de oportunidades de pesquisa sobre desempenho ambiental em AM foi realizada com base em 3 revisões de literatura, que abordaram: (i) Avaliação do ciclo de vida em AM, (ii) Simulação DES integrada com LCA e (iii) Integração de DES e LCA para análise de desempenho ambiental de AM. As bases de dados utilizadas foram a ISI Web of Knowledge (Web of Science, Social Sciences Citation Index – WoS/SSCI) e a SCOPUS, que são bases multidisciplinares de periódicos mundialmente conhecidas e que disponibilizam periódicos com fatores de alto impacto (TANG; MUSA, 2011).

3.4.1 Avaliação do ciclo de vida em AM

A análise dos impactos ambientais de AM pode ser realizada com a utilização de diferentes sistemáticas de avaliação, sendo uma delas a LCA (PRIARONE e INGARAO, 2017; AGRAWAL e VINODH, 2019; VÝTISK et al., 2019). A análise das fases de impacto do ciclo de vida com LCA é muito utilizada no entendimento sistêmico dos impactos ambientais em AM. Essa abordagem permite avaliar um Sistema de Produção considerando as fases de projeto, fabricação, uso e descarte do item e dos materiais e equipamentos utilizados na produção do item, em diferentes perspectivas e com o apoio de indicadores de desempenho ambiental (CHEN et al., 2015; DESPEISSE et al., 2017).

As entradas e saídas dos estudos de LCA em AM dependem das ferramentas computacionais e métodos usados para a análise de ciclo de vida (RIBEIRO et al., 2020). Os estudos de LCA em AM consideram como entradas (MOGNOL et al., 2006; SREENIVASAN e BOURELL; 2009; KREIGER e PEARCE, 2013; LE BOURHIS et al. 2014; BURKHART e AURICH, 2015; PENG, 2016; HUANG et al., 2016; JIN et al, 2017; BEKKER e VERLINDEN, 2018; INGARAO et al., 2018; MA et al., 2018): (i) consumo de materiais, (ii) consumo de energia, (iii) consumo de combustíveis, (iv) consumo de fluidos, (v) custos de materiais, (vi) custos de energia, (vii) variáveis e parâmetros dos processos e/ou (viii) resíduos gerados. As saídas dos estudos geralmente são indicadores relacionados a emissões, demanda de energia e custos.

As diferentes operações de processamento, pré-aquecimento, sistemas de alimentação, impressão, resfriamento, remoção de material e sistemas de controle consomem energia, o que demanda monitoramento sistêmico do consumo para a identificação do potencial de redução do impacto ambiental (FALUDI et al., 2015; WATSON e TAMINGER, 2018; GUTIÉRREZ-OSORIO et al., 2019). A energia consumida também deve ser avaliada durante o modo de espera e modo inativo de produção na AM (FALUDI et al., 2015; FORD e DESPEISSE, 2016). Vários estudos destacam e comprovam a importância do consumo de energia no impacto ambiental de tecnologias de AM: Kreiger e Pearce (2013), Faludi et al. (2015), Da Silva Barros et al. (2017), Yang et al. (2017b) e Ma et al. (2021).

Além das questões relacionadas ao consumo de energia em processos aditivos, Ribeiro et al. (2020) destacam a carência e precisão de informações sobre diversas etapas do ciclo de vida, o foco dos estudos na fase de produção do ciclo de vida, a falta de padronização para avaliar o consumo de materiais e energia, e a utilização de aproximações, estimativas e simplificações em estudos de impacto ambiental em AM. Agrawal e Vinodh (2019) identificaram que não há muitos dados disponíveis sobre consumo de recursos e emissões em processos de AM. Os autores também indicam a necessidade de estruturação de bancos de dados de inventário abrangentes para a aplicação da LCA em várias etapas de AM. Rejeski et al. (2018) identificaram que a maioria dos estudos ambientais sobre AM apresenta falta de dados em diferentes estágios do ciclo de vida, desde a matéria-prima até o fim da vida.

Métodos de caracterização de sustentabilidade para diferentes processos de AM também precisam ser desenvolvidos, com a definição de métricas de desempenho ambiental e do processo de medição (MANI et al., 2014). Portanto, existem

oportunidades de estudos que avaliem todos os dados de forma integrada (emissões do processo e consumo de energia e de recursos).

As fases do ciclo de vida consideradas em um estudo devem ser definidas a partir dos objetivos do estudo e da relevância da fase para a análise realizada (HUANG et al. 2016; RIBEIRO et al., 2020). Há estudos de análise de impacto ambiental em AM que consideram abordagens de berço ao portão (KREIGER e PEARCE, 2013; MALSHE et al., 2015; LUNETTO et al., 2021), do portão ao portão (NAGARAJAN et al., 2016), do portão ao túmulo (DA SILVA BARROS e ZWOLINSKI, 2016; PARIS et al., 2106) ou do berço ao túmulo (FALUDI et al., 2015).

O aumento da utilização da tecnologia AM pelas indústrias justifica a relevância de estudos sobre o desempenho ambiental de AM (GARCIA et al., 2018). A aplicação da LCA, para avaliação do desempenho ambiental de processos aditivos (LCA-AM), vem crescendo nos últimos 5 anos. Uma pesquisa realizada em setembro de 2023, na base de dados ISI *Web of Knowledge (Web of Science, Social Sciences Citation Index – WoS/SSCI)*, sem restrições de períodos de publicação e com as palavras-chave "*life cycle assessment*" e "*additive manufacturing*" (ou "*life cycle assessment*" e "*3D printing*") resultou em 229 trabalhos. As primeiras publicações LCA-AM foram realizadas em 2013. Um filtro de publicações nos últimos 5 anos reduziu o resultado para 182 publicações, ou seja, 79,5% das publicações ocorreram nos últimos 5 anos. A quantidade de publicações anuais nos anos de 2021 (33 publicações), 2022 (52 publicações) e 2023 (45 publicações) superam os anos anteriores, indicando a importância de pesquisas atuais sobre o tema LCA-AM.

O levantamento realizado permitiu identificar 44 artigos de revisão, publicados a partir de 2017. A análise desta amostra gerou informações sobre aspectos importantes das pesquisas realizadas em LCA-AM. Da amostra de 44 artigos de revisão foram selecionados 8 artigos (APÊNDICE A). A seleção foi realizada com base em uma análise subjetiva do autor, identificando os estudos que poderiam contribuir para o escopo do estudo desenvolvido. Os estudos descartados da análise são direcionados para setores, tecnologia e/ou uso de materiais específicos.

A análise dos estudos de revisão discriminados no APÊNDICE A permitiu identificar pontos em comum nas conclusões dos autores, que destacam a importância do uso da LCA na avaliação do desempenho ambiental da AM. Os pontos destacados são: (i) falta de dados de inventário ou dados não confiáveis (PENG et al., 2018; REJESKI et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019; GOPAL et al., 2022;

HEGAB et al., 2023), (ii) muitas suposições na aplicação da LCA (HEGAB et al., 2023), (iii) incertezas nos resultados e conclusões prematuras (REJESKI et al., 2018) e (iv) necessidade de estruturação de modelos confiáveis de consumo de energia elétrica e de materiais (AGRAWAL e VINODH, 2019).

Peng et al. (2018) e Hegab et al. (2023) indicam a necessidade de estudos de LCA-AM em função da área de sustentabilidade ambiental em AM estar em um estágio preliminar e os resultados disponíveis ainda gerarem conclusões prematuras sobre a tecnologia e o seu desempenho. Uma questão destacada, em 7 dos 8 artigos analisados, foi a falta de transparência no processo de aplicação da LCA e as incertezas nos resultados gerados. Isso se deve principalmente à falta de dados de inventário ou dados não confiáveis (dados de consumo de materiais e de energia, e geração de resíduos e emissões) e à quantidade de suposições/estimativas utilizadas na LCA, o que impede uma avaliação de desempenho ambiental mais precisa, confiável e aplicável para a tomada de decisões. Desta forma, são necessários estudos que contribuam com a coleta e/ou geração de dados de inventário de ciclo de vida para diferentes materiais, processos e/ou tecnologias de AM, com foco em unificação e padronização de dados sobre materiais, condições de produção, máquinas e aplicações (REJESKI et al., 2018; PENG et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019; SAADE et al., 2020; GOPAL et al., 2022; HEGAB et al., 2023).

Outro ponto de destaque é a necessidade da estruturação de modelos confiáveis que representem o consumo de energia elétrica e de materiais para a avaliação do desempenho ambiental de AM. Além disso, estudos de comparações de desempenho utilizando a LCA complementam as pesquisas na área. A LCA é utilizada, por exemplo, para a conversão dos consumos de materiais e de energia em CO₂ equivalente, o que permite comparações entre processos ou cenários diferentes do mesmo processo, e, conseqüentemente, orienta a tomada de decisão sobre as alternativas para redução do impacto ambiental (GARCIA et al., 2018; REJESKI et al., 2018; PENG et al., 2018; AGRAWAL e VINODH, 2019; GOPAL et al., 2022; HEGAB et al., 2023; JUNG et al., 2023).

3.4.2 Simulação DES integrada com LCA

Os modelos DES são utilizados para a simulação estocástica de sistemas produtivos ecoeficientes e análises de impactos econômicos e/ou ambientais. Pode-

se citar inúmeros estudos de referência com esta abordagem de DES que vêm sendo publicados nos últimos 15 anos: Solding et al. (2009); Page e Wohlgemuth (2010); Paju et al. (2010); Brondi e Carpanzano, (2011); Löfgren e Tillman (2011); Widok et al. (2012); Cataldo et al. (2013); Seow et al., (2013); Thiede et al. (2013); Sproedt et al. (2015); Fakhimi et al. (2016); Gbededo et al. (2016); Cerdas et al. (2017b); Keramydas et al. (2017); Solaimani et al. (2021); Sultan et al. (2021); Bui-Duy et al. (2023); e Ravichandran et al. (2023).

Por exemplo, Keramydas et al. (2017) utilizaram a DES para avaliar estratégias de minimização de custos e de emissões de CO₂ em uma cadeia globalizada com vários níveis de fornecimento. Sultan et al. (2021) usaram DES para simulação de reconfigurações de Cadeias de Suprimentos, e identificaram a organização que gera menores impactos ambientais em termos de emissões. Solaimani et al. (2021) utilizaram a DES para quantificar e comparar sistemas de produção aditivo e subtrativo. Os autores utilizaram DES para incorporar a variabilidade inerente nas operações na análise do desempenho ambiental em um cenário dinâmico de volume e diversidade de demandas.

Bui-Duy et al. (2023) usaram um modelo DES para avaliar a volatilidade dos indicadores financeiros e a emissão de CO₂ das mudanças nas matérias-primas para a produção de *pellets*, impactando na discussão de substituição de fontes de energia fóssil. Ravichandran et al. (2023) desenvolveram uma configuração de Cadeia de Suprimentos, baseada em logística reversa, e avaliaram seu funcionamento com apoio de DES. Os autores dos estudos citados destacaram a importância de estudos dedicados à abordagem quantitativa, baseada em simulação, no projeto e planejamento de sistemas que busquem a minimização do impacto ambiental.

Quando são avaliadas abordagens específicas para integrar DES com LCA (DES-LCA), Cerdas et al. (2017b) destacam que há poucos estudos sobre o tema. Na base WoS/SSCI, em uma pesquisa (realizada em setembro de 2023) com as palavras-chave "*life cycle assessment*" and "*discrete-event simulation*", foram identificadas 29 publicações desde 2003, sendo que 11 publicações - 37,9% - foram nos últimos 5 anos.

Trabalhos recentes reforçam a importância da integração DES-LCA em diferentes cenários. Haddad et al. (2023), Rödger et al. (2021), Solaimani et al. (2021) e Liu e Syberfeldt (2022) apresentaram propostas de integração para avaliação de processos produtivos, destacando a importância da integração do comportamento

estocástico na avaliação sistêmica dos impactos ambientais. Segundo Rödger et al. (2021), a integração dos modelos fornece indicadores que podem ser usados para interpretação combinada de impactos ambientais e operacionais.

Lyu et al. (2023) avaliaram os resultados de integração DES-LCA aplicada na análise do desempenho ambiental de um caso logístico. Mann et al. (2022) também abordaram a DES-LCA sob uma perspectiva logística, comparando uma rede de manufatura organizada de forma centralizada e descentralizada. Rahn et al. (2022) aplicaram DES-LCA para avaliar o desempenho ambiental das fases do ciclo de vida de uma aeronave. Stankiewicz et al. (2019), De Oliveira et al. (2020) e Ding et al. (2022) combinaram DES e LCA para a análise de cenários de gestão de resíduos.

3.4.3 Integração DES-LCA para análise de AM

Entende-se que a complexidade de planejamentos dinâmicos e problemas de projeto e operação em sistemas produtivos com AM podem ser abordados com a aplicação de modelos computacionais híbridos, integrando DES e LCA. O tipo de abordagem da LCA e da DES, sobre sistemas produtivos, justifica uma análise que busque a complementação das técnicas. A LCA tem uma visão operacional e econômica macro, sem um detalhamento de operações de produção e de transportes, com muitas suposições e agregação de dados para a aplicação da metodologia. A DES permite a modelagem da complexidade dinâmica dos processos no nível de atividades e tarefas de um processo, incorporando a variabilidade no tempo como um elemento de influência no desempenho ambiental de sistemas (STIEL et al., 2016).

Quando um levantamento de trabalhos e pesquisas é feito na direção da integração de LCA e DES para avaliação de AM, não há publicações disponíveis, o que indica uma lacuna de pesquisa no tema DES-LCA para cenários com AM. Pesquisas com as palavras-chave "*life cycle assessment*" e "*discrete-event simulation*" e "*additive manufacturing*" (ou "*life cycle assessment*" e "*discrete-event simulation*" e "*3D printing*"), nas bases SCOPUS e WoS/SSCI, foram realizadas em setembro de 2023 e não retornaram nenhum trabalho de integração DES-LCA-AM.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentadas e detalhadas as etapas do método de pesquisa para a realização do trabalho. A fim de preencher a lacuna de pesquisa identificada, uma abordagem de simulação foi proposta para apoiar a análise do impacto ambiental de um processo de distribuição de produtos com componentes produzidos por AM. A presente pesquisa aborda um caminho para complementar os resultados e análises de uma LCA padrão, a partir da incorporação de dados e informações gerados por um modelo de simulação DES.

O método de pesquisa foi estruturado em 5 etapas baseadas na modelagem de Pesquisa Operacional e apresentadas na Figura 4.1 (CAUCHICK-MIGUEL, 2018). A simulação é uma das classes de modelos de Pesquisa Operacional e orientou a definição das etapas de estruturação do método para medir os impactos do modelo DES-LCA no sistema real estudado e propor e experimentar soluções para o problema foco do estudo.

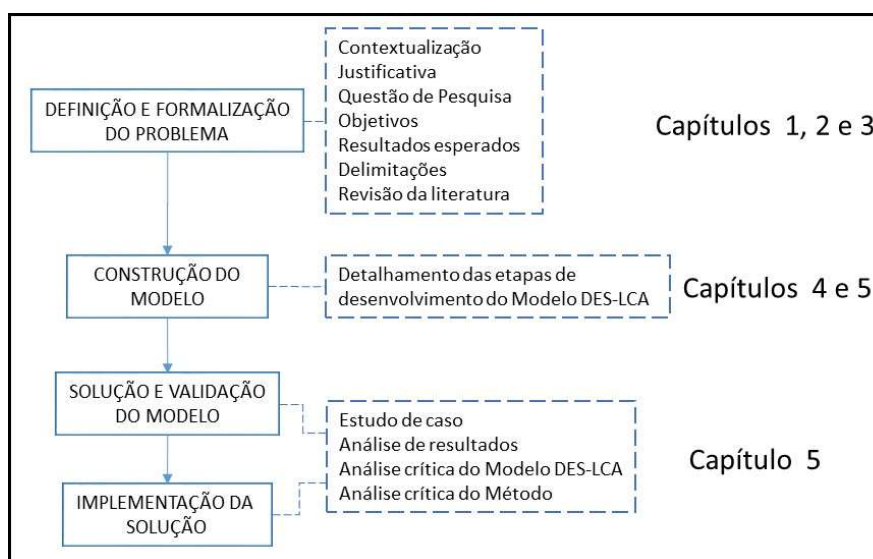


Figura 4.1 - Método de trabalho

Fonte: Adaptado de Cauchinik-Miguel (2018)

A etapa 'Definição e formalização do problema' foi realizada com a construção dos conteúdos apresentados nos capítulos de Introdução, de Objetivos e Delimitações e de Revisão Bibliográfica. Nesses capítulos são abordados o problema de avaliação de desempenho ambiental em AM, as justificativas para a proposta de um modelo DES-LCA para apoiar essa avaliação e os resultados esperados com o estudo. A literatura foi revisada a fim de avaliar o conhecimento sobre AM, LCA, DES-AM e DES-LCA, o que permitiu definir o problema específico da Tese.

As etapas de 'Construção do modelo' e de 'Solução e validação do modelo' são explicadas nas seções deste capítulo e do capítulo de 'Resultados e discussão'. A avaliação do modelo DES-LCA foi realizada a partir de um estudo de caso que permitiu aplicar as métricas de desempenho definidas e funcionou como uma prova de conceito. Na etapa de 'Implementação da solução' são sintetizadas as principais aprendizagens em todas as fases do projeto, bem como são apresentadas as análises críticas em relação ao método proposto e ao modelo DES-LCA testado.

O modelo DES-LCA proposto é apresentado na Figura 4.2 e se baseia nas propostas apresentadas em Haddad et al. (2023), Rödger et al. (2021) e Gbededo et al. (2018b), mas com ajustes nos fluxos de informações entre as etapas e com um escopo somente na perspectiva ambiental. Haddad et al. (20203) trabalharam nas perspectivas ambiental e social na avaliação de ciclo de vida. Além disso, a etapa de 'Definição dos objetivos e escopo' não gerava entradas para a simulação computacional com DES. Já na proposta de Rödger et al. (2021), são definidos parâmetros para as modelagens DES e LCA na etapa de 'Definição dos objetivos e escopo'. Em Gbededo et al. (2018b) o foco é na análise das atividades de desenvolvimento e *design* de produto, com avaliação na perspectiva social e com o modelo conceitual desenvolvido a partir das informações da etapa de 'Definição dos objetivos e escopo'.

No modelo proposto nesta Tese a etapa de 'Definição dos objetivos e escopo' gera dados e informações para os módulos de DES e de LCA. O módulo de simulação computacional é utilizado para analisar as repercussões de mudanças no sistema sobre o desempenho ambiental. O DES é utilizado para quantificar e incorporar variabilidade nas entradas e saídas dos elementos considerados na configuração de entrega de matérias-primas, produção de componentes, montagem do produto e distribuição para os demandantes.

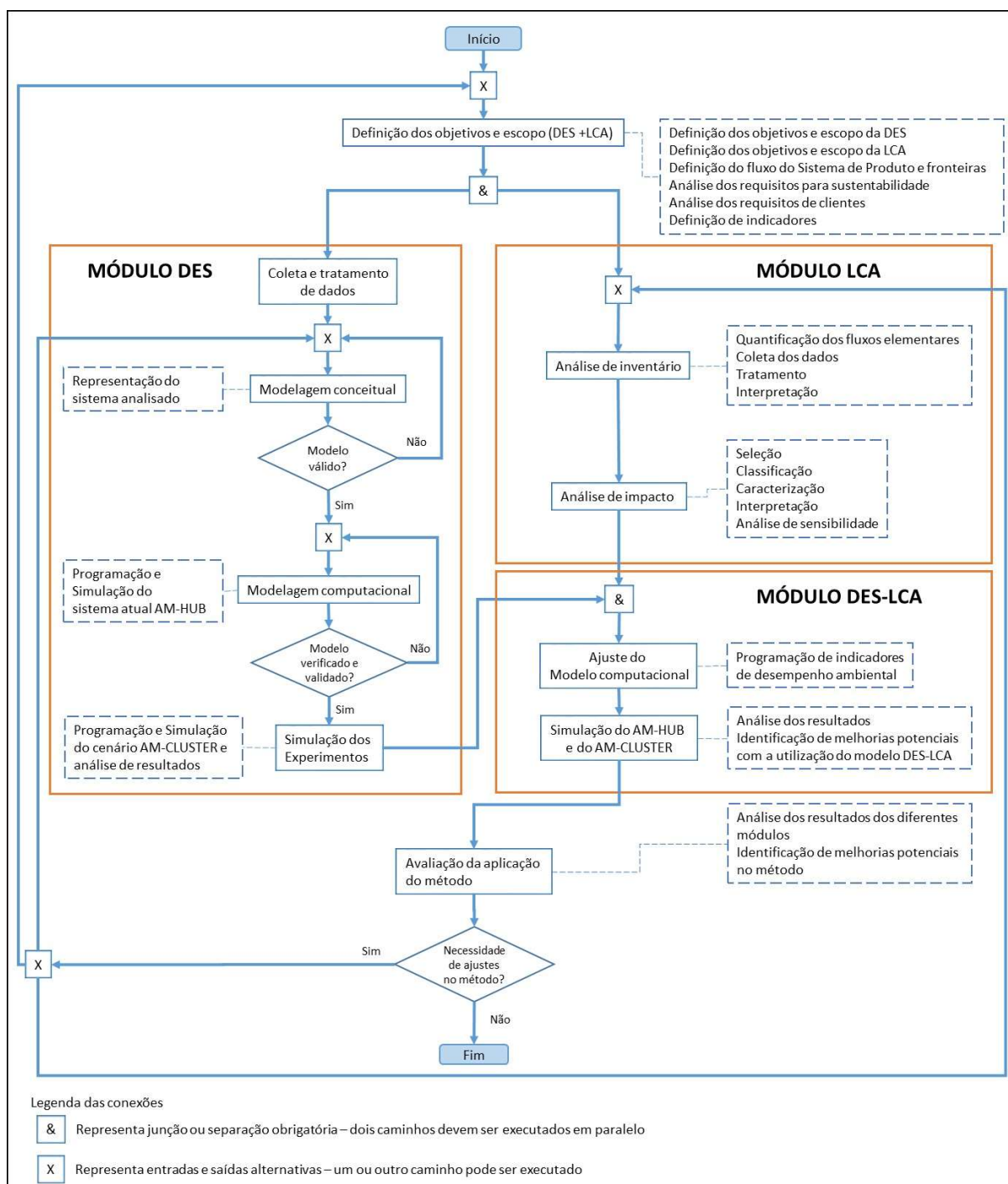


Figura 4.2 - Proposta de método de desenvolvimento do modelo DES-LCA

Fonte: Adaptado de Haddad et al. (2023), Rödger et al. (2021) e Gbededo et al. (2018b)

O módulo de LCA gera informações para apoiar a modelagem de um desempenho ambiental dinâmico no sistema simulado. O foco da integração da simulação com a LCA é apoiar as etapas de inventário e avaliação de impacto ambiental, incorporando variabilidade nas análises de desempenho ambiental. O

módulo LCA foi estruturado para gerar dados e informações de diferentes configurações de organização da AM no Sistema de Produção analisado.

Uma comparação dos resultados gerados pelo modelo DES-LCA e pela aplicação da LCA clássica também é realizada para avaliação dos ganhos com a integração da simulação computacional na avaliação de desempenho ambiental de AM. Além disso, a etapa de análise do método proposto permite identificar ajustes necessários para aplicações em estudos futuros.

4.1 Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo

Na primeira etapa são definidos os objetivos e o escopo do estudo de LCA, sendo estabelecidos os limites do sistema, a unidade funcional e o fluxo de referência. Também são discriminadas a aplicação do estudo e o público-alvo, as categorias de impacto e o procedimento de alocação (ISO 14044, 2006). Essas definições para a LCA também são consideradas como entrada da modelagem do módulo DES.

As modelagens DES e LCA são realizadas com base na função definida para o produto/serviço, na unidade funcional, que quantifica a(s) função(ões) identificada(s) do sistema de produto (características de desempenho do produto), e no fluxo de referência, que representa a quantidade de produto/serviço necessária para atender a unidade funcional. A unidade funcional é uma das escolhas mais cruciais em uma LCA, pois tem a função primária de fornecer uma referência à qual as entradas e saídas do sistema analisado são relacionadas (ISO 14044, 2006; BJØRN et al., 2018a).

Na primeira etapa também é avaliado o detalhamento do modelo do sistema analisado e devem ser consideradas decisões sobre critérios de corte (para limitação de entradas e saídas), o que impacta na delimitação do sistema (processos e dados considerados). Quanto menos limitações de entradas e saídas, mais processos considerados e/ou maior número de categorias de impacto analisadas, maior a complexidade da LCA.

Os critérios de corte utilizados em LCA objetivam simplificar as entradas e saídas do sistema modelado. A ISO 14044 (2006) indica critérios relacionados ao percentual de massa ou volume, de energia (poder calorífico) e de relevância do impacto ambiental. Os percentuais são analisados em relação ao produto entregue, ou seja: percentual de massa ou volume em relação à massa ou volume do produto;

percentual de poder calorífico em relação ao poder calorífico do produto; e percentual do impacto ambiental do elemento em relação ao impacto total do produto.

A alocação é um procedimento subjetivo, que define como distribuir os impactos ambientais nas entradas e saídas (produtos e coprodutos), utilizando *drivers* de alocação como, por exemplo, massa ou energia. Um maior valor do *driver* para a entrada ou saída orienta a alocação de um impacto maior na entrada ou saída. Um maior detalhamento do sistema, subdividindo processos, ou a expansão das fronteiras do sistema permitem diminuir/eliminar a subjetividade na alocação (ISO 14044, 2006).

A alocação define se é estruturada uma LCA atribucional ou consequential. A abordagem atribucional aloca os impactos absolutos de um produto ou sistema (entradas e saídas) na unidade funcional em um determinado ponto no tempo (passado, presente ou futuro), apresentando uma visão estática do sistema de produto e não considera efeitos indiretos resultantes de alterações na saída do sistema. Já a abordagem consequential permite uma análise dinâmica, que avalia consequências no sistema de produto geradas, por exemplo, por mudanças na demanda da unidade funcional definida, na produção, no consumo de materiais e/ou nos descartes gerados. Efeitos indiretos dentro e fora do ciclo de vida podem ser avaliados com a abordagem consequential (PELLETIER et al., 2015; EKVALL et al., 2016; SAADE et al., 2020).

Os objetivos do estudo, bem como o sistema analisado, a unidade funcional e o fluxo de referência, orientam a seleção dos indicadores e as categorias de impacto ambiental dentro da modelagem LCA (ISO 14044, 2006). As categorias de impacto e os indicadores devem ser definidos em função da classificação dos impactos ambientais conforme a ISO 14040 (2006): danos potenciais ao meio ambiente natural, danos à saúde humana e consumo de recursos.

Os indicadores definidos para as análises de desempenho, nas dimensões operacional e ambiental, devem apoiar a comparação das diferentes configurações do sistema analisado e o monitoramento de desempenho das mesmas. A definição dos indicadores deve considerar as etapas pré-AM, de AM e pós-AM abordadas nos módulos DES e LCA do modelo proposto (Figura 2.1).

Em estudos de LCA não há obrigatoriedade de escolha de todos os indicadores e/ou categorias de impacto disponíveis no método, mas deve-se identificar, selecionar e justificar aqueles que apoiam as tomadas de decisão para atender os objetivos propostos e as análises dentro dos limites do sistema estudado (TADDESE et al., 2020). Os indicadores selecionados para a análise devem ser relevantes para o

desempenho do processo em relação à unidade funcional e representar as operações consumidoras de energia e de materiais, bem como as com potencial de geração de emissões (KELLENS et al., 2012).

Destaca-se ainda que na realização das etapas de LCI e LCIA, categorias de impacto e indicadores, não considerados inicialmente, podem ser incorporados posteriormente nas análises e na quantificação dos impactos ambientais. A metodologia LCA é interativa, permitindo, por exemplo, a revisão de objetivos, unidade funcional e categorias de impacto durante as etapas de LCI e/ou LCIA.

Tadesse et al. (2020) sugerem indicadores operacionais que impactam no desempenho ambiental de sistemas AM dentro de 8 categorias: Material, Energia, Água, Biodiversidade, Emissões/Efluentes/Resíduos, Produto e Serviço, Conformidade e Transporte. Os indicadores devem considerar os parâmetros operacionais importantes na análise de ciclo de vida da AM.

No estágio de pré-AM são importantes os parâmetros: disponibilidade de material e energia; extração; processamento; logística de distribuição; e armazenamento de matérias-primas e de insumos. No estágio de AM são consideradas: as entradas e saídas do processo; a infraestrutura, maquinário, equipamentos e ferramentas; a armazenagem e estoque; a segurança e impactos na saúde; a performance dos recursos; as emissões, resíduos e consumo de energia; e a qualidade do produto. No estágio pós-AM é considerada a logística de distribuição e seus parâmetros de eficiência no consumo de energia e nas emissões, que dependem da localização dos processos aditivos na Cadeia de Suprimentos, das distâncias de transporte e do modal de transporte; bem como a utilização e final da vida útil do item analisado (TADDESE et al., 2020). Como o presente estudo é uma análise do portão ao portão, nem todos os parâmetros operacionais discriminados foram utilizados.

Na dimensão ambiental, os indicadores devem estar alinhados com a escolha de categorias de impacto da LCA. Exemplos de categorias de impacto foram citadas na seção 3.3.1. Os indicadores ambientais estão relacionados aos indicadores de desempenho das operações de produção e logísticas como, por exemplo, o número de produtos fabricados, matérias-primas utilizadas, disponibilidade e utilização de máquinas, eficiência dos processos, resíduos gerados, taxa de retrabalho e transportes realizados (GREINER, 2001; TADDESE et al., 2020). Esses indicadores

geram dados de consumo de energia, de combustíveis e emissões de CO₂, que são fundamentais na análise do desempenho ambiental (HEILALA et al., 2008).

4.2 Simulação do Sistema de Produção AM com DES

O módulo DES se baseia em metodologias de projeto de desenvolvimento e implementação de modelos de simulação computacional. Na Figura 4.3 são representadas as etapas do módulo de simulação DES.

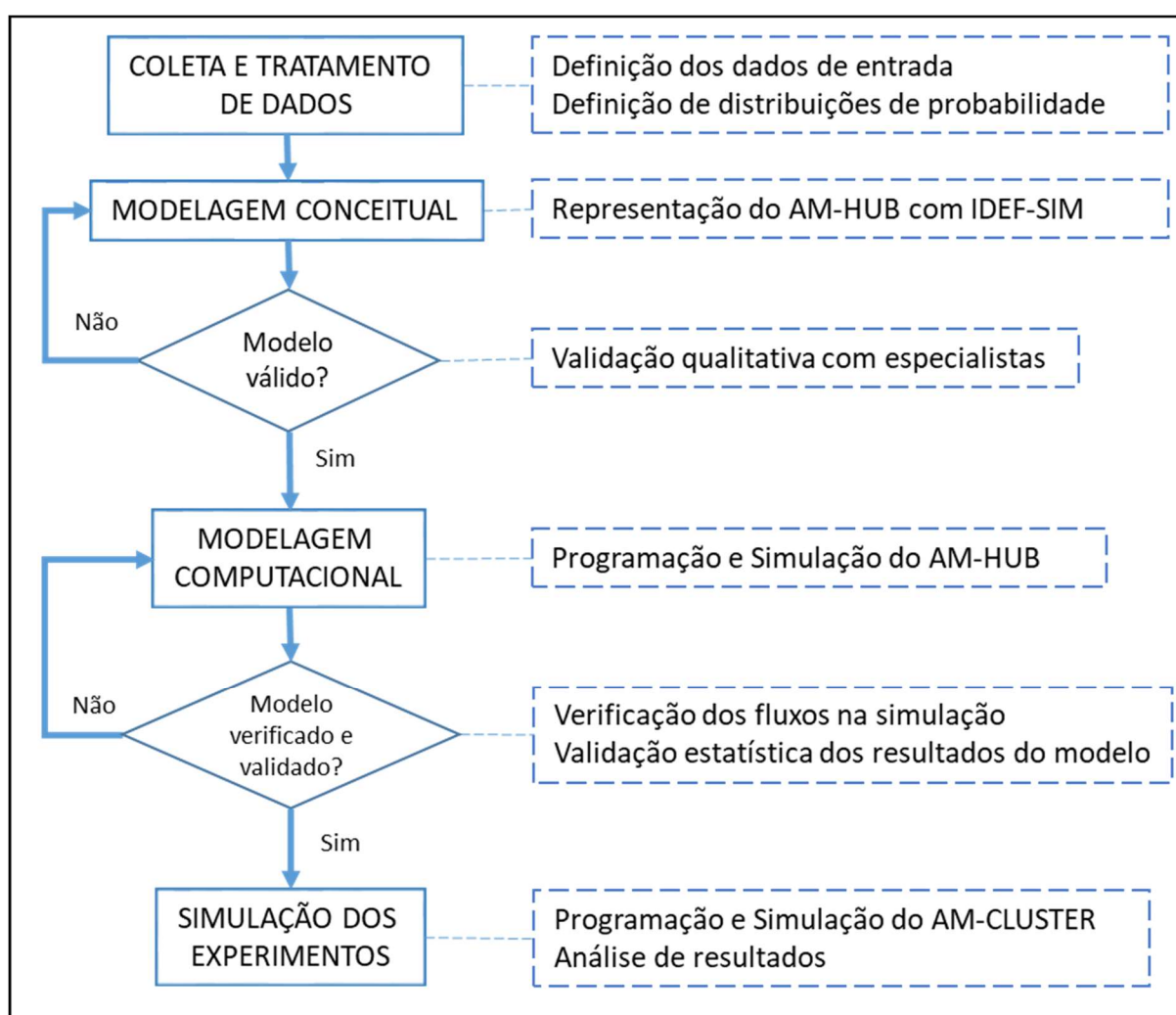


Figura 4.3 - Etapas do módulo de simulação computacional DES

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As etapas obrigatórias em um projeto de modelagem e simulação computacional são (LAW e KELTON, 2000; HARREL et al., 2002): (i) Formulação do problema e planejamento do estudo, (ii) Coleta e tratamento de dados, (iii) Modelagem

conceitual e validação do modelo, (iv) Construção, verificação e validação do modelo computacional e (v) Simulação do(s) experimento(s) e análise dos resultados.

No módulo DES aplicado neste estudo e representado na Figura 4.3, a etapa de formulação do problema e planejamento não está representada, pois essa etapa foi abordada na etapa de 'Definição dos objetivos e escopo' do modelo proposto (Figura 4.2). Desta forma, na presente seção são detalhadas as etapas restantes para o desenvolvimento de um projeto de simulação computacional.

4.2.1 Coleta e Tratamento de Dados

Os dados de entrada de um processo aditivo para Simulação de Eventos Discretos são: chegadas de pedidos e de ordens de produção, chegadas de matérias-primas, tempos de transporte e de movimentação, tempos de produção (*setup*, aquecimento, fabricação, limpeza, acabamento, montagem), taxa de resíduos, taxa de retrabalho, taxa de produtos não conformes, consumo de materiais e consumo de energia. Os parâmetros operacionais e dados necessários para o entendimento do funcionamento de um processo AM e/ou de uma Cadeia de Suprimentos com AM foram discriminados nas seções 3.1.2, 3.2.1 e 3.2.2.

Os dados utilizados na simulação devem ser confiáveis e representativos da realidade do sistema produtivo real analisado, pois os resultados da simulação dependem da qualidade dos dados de entrada. Na simulação DES, o estado dos elementos de um modelo de simulação (entidades, fluxos e recursos) muda a partir de eventos discretos em uma sequência de tempo (LAW e KELTON, 2000; TAKO e ROBINSON, 2012). Desta forma, o modelo de simulação computacional pode representar o sistema real de forma mais confiável se forem utilizadas variáveis estocásticas para representação de tempos entre chegadas de pedidos, tempos de operação e tempos logísticos (SPROEDT et al., 2015).

A utilização de distribuições de probabilidade das variáveis estocásticas permite representar o comportamento real do sistema, incorporando variabilidade nos tempos operacionais e logísticos para o atendimento das demandas. As amostras de dados de tempos são utilizadas para a definição de distribuições de probabilidade dos tempos de operações e dos tempos de transporte. As distribuições de probabilidade são definidas a partir de um teste de aderência como, por exemplo, o teste não-paramétrico de Kolmogorov e Smirnov, que verifica a qualidade na escolha da

distribuição que melhor representa o comportamento da variável analisada. Teoricamente, procura-se provar a hipótese de que o conjunto de dados amostrados não difere de maneira significativa daquele esperado de uma distribuição teórica especificada (HINES e MONTGOMERY, 1990).

Em casos de não disponibilidade de uma amostra de dados operacionais, as amostras podem ser geradas com valores aleatórios para a definição das distribuições. Nestes casos, as variáveis são caracterizadas pelos parâmetros disponíveis como, por exemplo, valores médio, mínimo e máximo. Além disso, para testar um maior número de distribuições, o valor médio pode ser considerado como o valor de moda para ajuste de distribuição triangular, por exemplo; e os valores mínimos e máximos das variáveis são utilizados para definição de um desvio padrão, o que permite a geração de amostras de valores com distribuição normal e distribuição lognormal (FORBES e EVANS, 2010).

A etapa de coleta e tratamento de dados é finalizada, no presente estudo, com a clusterização das localizações dos demandantes para a estruturação e simulação de uma ou mais alternativas de organização do AM-CLUSTER. A clusterização neste caso é o agrupamento das localizações (n objetos) em K clusters, sendo o parâmetro de análise a proximidade entre objetos. A aplicação da clusterização é uma opção para agrupamentos quando o pesquisador identifica uma tendência de agrupamento dos objetos analisados (SMITH e JAIN, 1984).

O objetivo do agrupamento de dados com essa técnica é descobrir o(s) agrupamento(s) natural(is) de um conjunto de objetos/pontos com base em uma medida de similaridade, ou de dissimilaridade, e apoio de algoritmos. A similaridade entre objetos no mesmo grupo deve ser alta e entre objetos de grupos diferentes deve ser baixa (JAIN, 2010; EVERITT *et al.*, 2011).

Um dos algoritmos utilizados é o *K-means*, que encontra agrupamentos do conjunto de objetos a partir da minimização do somatório das diferenças (em módulo ou elevadas ao quadrado) das distâncias entre a média (centro) do *cluster* e cada objeto agrupado no *cluster* (erro quadrático). O algoritmo utiliza, por exemplo, a Distância Euclidiana para calcular a distância entre pontos e centros de *cluster*. Com o uso de distância na clusterização, busca-se o agrupamento por maior proximidade e menor distância entre o centro do *cluster* e os pontos analisados. Para a aplicação do algoritmo é definido o número de K clusters de agrupamentos que devem ser

executados no algoritmo. Desta forma, são testados diferentes valores de K e o melhor valor de K é escolhido com base em um critério predefinido (JAIN, 2010).

O algoritmo *K-means* é classificado como um método de clusterização não-hierárquico, adequado para situações que demandam a definição de um número fixo de grupos (EVERITT *et al.*, 2011). No caso analisado (AM-CLUSTER) são definidos agrupamentos fixos para localização da operação AM no centro do *cluster* ou próximo dele. Diferenças entre métodos hierárquicos e não-hierárquicos, bem como orientações sobre aplicações de clusterização, podem ser obtidos em Everitt *et al.* (2011).

4.2.2 Modelagem Conceitual

A modelagem conceitual consiste na representação e entendimento do sistema analisado, a partir da coleta de dados e informações sobre os fluxos relevantes para a resolução do problema identificado. O modelo conceitual representa o comportamento do sistema e deve ser documentado de forma a facilitar a etapa de modelagem computacional, ou seja, representando os requisitos e elementos que orientam a programação em *softwares* de simulação: entidades, locais recursos, movimentações, transportes, funções, controles e regras lógicas (MONTEVECHI *et al.*, 2014).

A modelagem conceitual é realizada a partir da definição dos objetivos e escopo do estudo proposto (apresentados na seção 4.1), o que orienta a delimitação do sistema simulado. O sistema simulado é representado pelos fluxos de materiais, componentes, insumos, produtos e informações necessárias para a caracterização qualitativa dos processos analisados. No presente estudo foi estruturado o modelo conceitual da configuração AM-HUB. A configuração AM-HUB representa o funcionamento real do sistema analisado e foi utilizada para a validação dos modelos conceitual e computacional.

Para apoiar esta etapa foi selecionada a técnica *Integrated Definition Methods - Simulation* (IDEF-SIM), que utiliza elementos lógicos da série de técnicas IDEF, mas adaptados para modelos de simulação computacional (LEAL *et al.*, 2008; MONTEVECHI *et al.*, 2010). As técnicas utilizadas como base para o IDEF-SIM foram o IDEF0 (*Function Modeling Method*) e o IDEF3 (*Process Description Capture Method*), mais indicados para modelagem de processos de negócios (MAYER *et al.*,

1995; AGUILAR-SAVÉN, 2004). A notação do IDEF-SIM e seus elementos, detalhados em Leal et al. (2008), apoiam a documentação dos fluxos e parâmetros relevantes dos processos considerados.

Na literatura há várias técnicas de modelagem conceitual para apoiar projetos de simulação computacional (ROBINSON, 2004; GABRIEL et al., 2022). No estudo de Gabriel et al. (2022) é apresentada uma revisão sistemática da literatura sobre as práticas e técnicas de modelagem conceitual, corroborando a escolha do presente estudo em relação à técnica IDEF-SIM para projetos de simulação DES. Montevechi et al. (2010) e Pereira et al. (2015) também indicam a utilização da técnica em projetos de simulação com modelagem DES.

A validação do modelo conceitual considera a representação do sistema real, com todos os detalhes pertinentes para potencializar uma verificação e uma validação positivas na etapa de modelagem computacional. O modelo computacional deve replicar da melhor forma possível o sistema real, e isso depende de um modelo conceitual bem estruturado e validado (MONTEVECHI et al., 2010). A validação é um processo qualitativo, realizado por especialistas em modelagem computacional e/ou no sistema real que está sendo modelado, avaliando os fluxos, entidades, operações, recursos e dados de entrada do sistema (SARGENT, 2013).

4.2.3 Modelagem Computacional

O modelo de simulação aplicado neste estudo é uma técnica de modelagem e simulação amplamente utilizada no apoio à tomada de decisão em gestão de Sistemas de Produção e de Cadeia de Suprimentos com AM, a Simulação de Eventos Discretos (DES). As justificativas de utilização da DES foram apresentadas na seção 3.1.4.

A DES modela sistemas como uma série de eventos discretos, representada por uma estrutura de rede de filas e atividades, que mudam de estado em pontos discretos e irregulares de tempo (LEE et al., 2002; ROBINSON, 2004; RABELO et al., 2005). Após a programação do modelo em um *software*, o mesmo deve ser verificado pela simulação de uma rodada de teste e análise dos fluxos dos transportes efetuados para entrega de matérias-primas e produtos. Também são verificados os fluxos de matérias-primas, peças, componentes e produto dentro do sistema analisado.

A modelagem computacional sempre aborda o *trade-off* simplicidade versus detalhamento do modelo; e a decisão sempre é relativa aos objetivos do projeto executado (LAW e KELTON, 2000). Desta forma, simplificações no modelo computacional objetivam reduzir o tempo de modelagem, mas devem ser avaliadas nas etapas de verificação e validação do modelo computacional.

Nesta etapa também são definidos o tempo de execução da simulação (rodada de simulação), o número de replicações e, se necessário, um tempo de aquecimento. O tempo de aquecimento para a simulação é utilizado quando um sistema simulado não está em um estado próximo ao estado estacionário, o que gera dados que devem ser retirados das análises dos resultados (SPROEDT et al., 2015).

Como são utilizados dados gerados a partir de distribuições estatísticas, a definição do número de replicações da rodada de simulação é orientada pela necessidade de capturar a variabilidade do comportamento do sistema. Os tempos entre chegadas de pedidos, tempos de transporte e tempos de produção variam conforme a distribuição de probabilidade definida na etapa de coleta e tratamento de dados, sendo que cada replicação pode gerar *outputs* diferentes de número de entregas, de tempos de produção, de tempos de entrega, de consumo de insumos e/ou utilização dos recursos (máquinas e veículos).

Em uma rodada de simulação é realizado um determinado número de replicações. Inicia-se com um número de replicações definido pelo programador (n) que permite gerar dados para o cálculo da precisão do resultado da amostra de replicações (h), utilizando a Equação (4.1). A partir da precisão calculada é definido o número de replicações para uma precisão desejada pelo programador, utilizando a Equação (4.2) (CHWIF; MEDINA, 2010).

$$h = t_{n-1; \alpha/2} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

$$n^* = \left\lceil n \times \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (4.2)$$

Onde: h é a precisão calculada para a amostra inicial; $t_{n-1; \alpha/2}$ é a distribuição t de *Student* para $n-1$ grau de liberdade e um nível de significância de $\alpha/2$; S é o desvio padrão da amostra de replicações iniciais; n é o número de replicações iniciais; n^* é o número de replicações para a precisão desejada; h^* é a precisão desejada.

Para realizar a validação do modelo computacional são comparados os *outputs* do modelo com dados do sistema real. Os *outputs* do modelo computacional são gerados com as replicações de simulação. O número de entregas, os tempos de produção, os tempos de transporte e a utilização de equipamentos são geralmente utilizados para a validação de modelos que representam sistemas de manufatura, mas as variáveis de validação dependem do sistema e dos objetivos do estudo. Utilizando a Equação (4.3), verifica-se a média da diferença entre os resultados da simulação (*outputs* do modelo computacional) e os resultados reais (CHWIF e MEDINA, 2010).

$$\text{Intervalo} = X_{DIF} \pm \left(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}} \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.3)$$

Onde: X_{DIF} é a média da diferença dos resultados gerados a partir da simulação e dos resultados do sistema real; $t_{n-1; \alpha/2}$ é a distribuição t de *Student* para $n-1$ grau de liberdade e um nível de significância de $\alpha/2$; S_{DIF} é o desvio padrão da amostra da diferença entre o sistema real e o simulado; n é o número de resultados comparados (tamanho da amostra de diferenças).

O modelo é considerado válido quando o intervalo calculado na Equação (4.3) contém o 0 (zero) dentro dos limites superior e inferior do intervalo. Quando os limites inferior e superior do intervalo resultarem em dois números positivos ou em dois negativos, o intervalo não contém zero e o modelo não pode ser considerado para representação do sistema (CHWIF e MEDINA, 2010). Com o modelo validado são realizados experimentos de mudanças no sistema e os resultados dos experimentos podem ser considerados para inferências sobre o sistema real estudado.

4.2.4 Simulação de Experimentos

Na etapa de simulação de experimentos são programados modelos de organização da produção e distribuição dos protetores faciais dentro de *clusters* (AM-CLUSTER) definidos na etapa discriminada na seção 4.2.1. A rodada de simulação é a mesma definida na etapa de modelagem computacional e validação do modelo AM-HUB.

A comparação dos resultados das diferentes configurações de produção e distribuição permite avaliar a sensibilidade dos resultados em relação a mudanças em

parâmetros críticos. Os modelos computacionais permitem análises relacionadas a mudanças e melhorias de eficiências nas operações e transportes, impactando no desempenho operacional e ambiental das diferentes configurações.

Na etapa de experimentação o objetivo é identificar potenciais de melhoria no sistema de produção e apoiar a decisão sobre quais aspectos ambientais o estudo deve aprofundar. Com análises de mudanças na organização da AM-HUB, podem ser avaliadas melhorias individuais e/ou combinadas, para que os tomadores de decisão possam identificar onde atuar para melhorar o desempenho operacional e ambiental do sistema analisado. A configuração alternativa da organização do AM-HUB em um AM-CLUSTER tende a impactar nas variáveis relacionadas a emissões geradas por alterações no transporte e, conseqüentemente, no consumo de combustível e no consumo de energia.

4.3 Avaliação do desempenho ambiental com LCA

Na Figura 4.4 são discriminadas as etapas necessárias para a avaliação do desempenho ambiental do sistema do produto dentro do método proposto. A etapa de 'Definição de Objetivo e Escopo' foi detalhada na seção 4.1. Nesta seção são discriminadas as etapas de 'Análise de Inventário' e 'Avaliação de Impacto'.

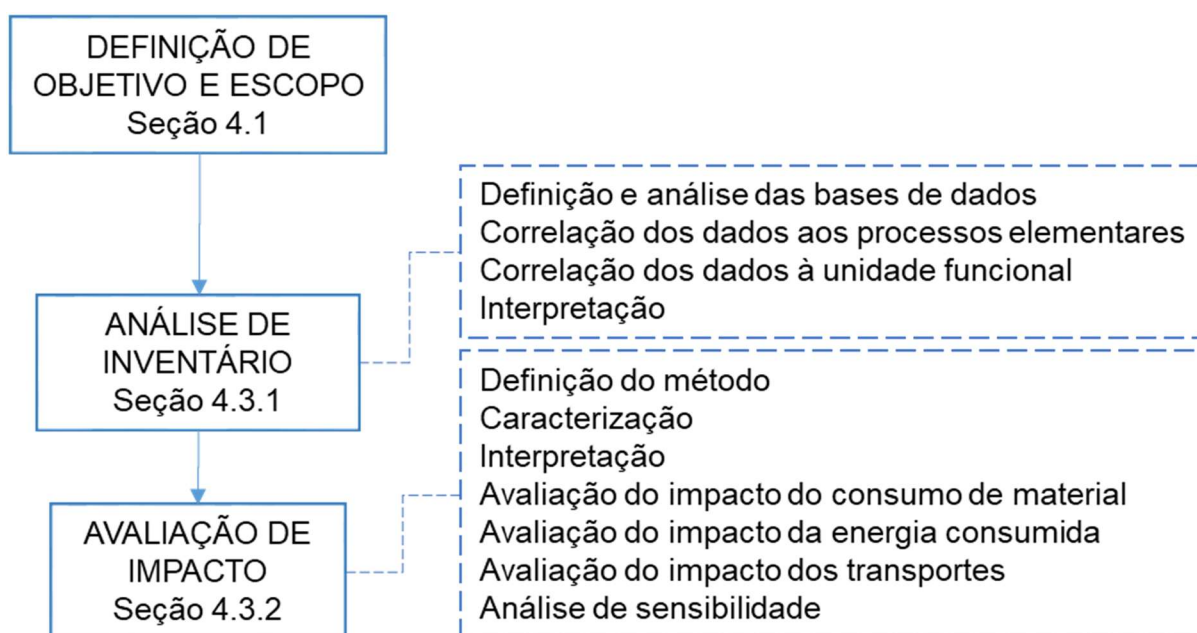


Figura 4.4 - Etapas de avaliação do ciclo de vida

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Um estudo de LCA permite avaliar todas as fases do ciclo de vida de um produto em relação ao potencial de geração de impactos relevantes ao meio ambiente. As etapas de LCI e LCIA permitem a identificação e análise dos fluxos de massa e energia envolvidos nos processos operacionais e logísticos de um sistema. A LCA deve ser aplicada conforme as normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) e com a utilização de um *software* para modelagem dos fluxos, inventários dos processos e avaliação do impacto.

4.3.1 Análise de Inventário

O inventário do ciclo de vida é baseado na coleta de dados primários e secundários e na quantificação de todos os fluxos relacionados ao sistema de produto, levando em consideração a unidade funcional definida (BRUNDAGE et al., 2019; VÝTISK et al., 2019). Na etapa de inventário (LCI) são mapeados e quantificados os fluxos de entrada (recursos, insumos, matérias-primas, energia), de processamento e de saída (produtos, coprodutos, resíduos e emissões para o ar, água e solo), discriminando os dados ambientais (relacionados a material, energia, transporte, transformação e resíduos) e as fases do produto (fabricação e montagem, no caso deste estudo) (SONNEMANN et al., 2004; ISO 14044, 2006; JIANG et al., 2019; MACIEL et al., 2019; VÝTISK et al., 2019).

O sistema de produto definido influencia na complexidade da quantificação do processo e da aquisição dos dados para o inventário. O inventário inicia com a definição das fontes dos dados primários, secundários e da literatura, os quais serão utilizados para a avaliação e quantificação da unidade de processo. Devem ser consideradas as coberturas temporal, tecnológica e geográfica dos dados, pois a aplicabilidade adequada dos resultados da LCA e a reprodutibilidade da avaliação estão limitadas ao contexto geográfico, temporal e tecnológico no qual foram modelados (ISO 14044, 2006; SAADE et al., 2020).

Há bancos de dados de LCI disponíveis e que fornecem dados médios sobre os impactos ambientais de materiais específicos e de produção, suporte ou processos de transporte (DUFLOU et al., 2011). Mas a literatura também indica uma disponibilidade limitada de dados de LCI nas fases do ciclo de vida de diferentes produtos fabricados a partir da variedade existente de tecnologias de manufatura (KELLENS et al., 2014; BRUNDAGE et al., 2019; OROS DARABAN et al., 2019). Além

disso, um inventário pode envolver alta incerteza, pois muitas suposições são subjetivas ou difíceis de justificar (FINNVEDEN, 2000; SHIN et al., 2017).

Na falta de dados que representem a realidade local do processo analisado, devido à escassez de inventários brasileiros, são utilizados dados de outros locais/países. A adaptação de dados de LCI de uma região para outra pode ser uma alternativa para a escassez de dados, mas pode orientar o uso de dados não representativos do local específico analisado e gerar resultados que não reflitam a realidade do sistema de produto analisado (HENRIKSEN et al., 2017). Neste caso, as análises devem ser mais criteriosas em relação à representatividade do dado utilizado para o local específico analisado, pois o objetivo é gerar resultados que reflitam a realidade do sistema de produto estudado.

Destaca-se que o desenvolvimento dos inventários de ciclo de vida no Brasil é mais recente, e os inventários disponíveis nos *softwares* especialistas de LCA possuem mais informações de inventários europeus e norte-americanos. Informações mais detalhadas sobre o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida podem ser obtidas em SICV Brasil (2023).

Dados que não podem ser coletados e que não estão disponíveis na literatura ou nos bancos de dados do *software* especialista de LCA, são estipulados a partir da *expertise* de especialistas nos processos. As restrições e definições em relação à coleta de dados devem ser documentadas, e a norma ISO 14044 (2006) orienta a utilização de folhas de coleta de dados para auxiliar no entendimento da organização dos dados e da natureza das informações necessárias, disponibilizando exemplo de folhas de coleta de dados na documentação da norma. Essas definições em relação aos dados utilizados impactarão na qualidade e incerteza das informações de entrada do estudo e, conseqüentemente, nos resultados (ISO 14044, 2006; SAADE et al., 2020).

A compilação dos dados de inventário coletados permite calcular as entradas e saídas totais e, posteriormente, um estudo de balanço de massa e/ou de energia do sistema do produto para apoiar a validação dos dados (ISO 14044, 2006). A validação objetiva a identificação de falta de informações importantes para o estudo e de erros nos estudos de balanço de massa e energia. Isso pode orientar ajustes na etapa de 'Definição de objetivos e do escopo', o que pode potencializar a obtenção de um inventário consistente e válido.

A ISO 14040 (2006) orienta que a validação dos dados coletados é fundamental para as etapas posteriores de análises de correlação dos dados de entradas e saídas aos processos unitários, aos fluxos de referência e à unidade funcional. As quantidades de entradas e saídas, validadas, são normalizadas de acordo com a unidade funcional definida e os resultados são organizados para conclusão da etapa de inventário. Resumindo, na LCI as unidades de processos ou o sistema de produto devem ser detalhados, bem como as técnicas de coleta de dados, de normalização e os balanços de massa e energia (ISO 14044, 2006).

4.3.2 Avaliação de Impacto

O inventário gerado na etapa LCI é utilizado para a quantificação e avaliação de impacto ambiental. Na etapa de LCIA é avaliada a magnitude e a importância dos impactos ambientais de cada fluxo inventariado dentro dos limites do sistema de produto definido (AGRAWAL e VINODH, 2019; JIANG et al., 2019).

A avaliação LCIA é estruturada em quatro etapas consecutivas (ISO 14044, 2006; VÝTISK et al., 2019; ISLAM, 2021): classificação, caracterização, normalização e ponderação. As duas primeiras são obrigatórias em qualquer estudo de LCA, e a aplicação das outras etapas dependerá do método utilizado, dos indicadores gerados e como será o processo de avaliação dos resultados dos danos ambientais.

O primeiro passo na LCIA é a classificação, que orienta a atribuição de resultados do inventário (LCI) para diferentes categorias de impacto; seguida da caracterização, que serve para quantificar o nível da influência dos fluxos inventariados nas categorias de impacto; da normalização, realizada a partir da comparação com um valor de referência; e, por fim, é realizada a ponderação, ou seja, a definição da importância das categorias de impacto e o cálculo de uma pontuação única (ISO 14044, 2006; VÝTISK et al., 2019; ISLAM, 2021).

Os valores de saída do inventário, que contribuem para uma categoria de impacto, são multiplicados por um fator de caracterização que expressa sua contribuição no impacto analisado. Os valores finais da etapa de caracterização são representados pela emissão de uma substância de referência. Por exemplo, o GWP é representado pela emissão de CO₂, que é o padrão de referência comum para o aquecimento global ou impacto de gases de efeito estufa (capacidade de retenção de calor) (ISLAM, 2021; SIMAPRO, 2022).

A ISO 14040 (2006) não indica o modelo de caracterização que deve ser utilizado. Os métodos usados para caracterização consideram um caminho de causa-e-efeito, no qual o indicador utilizado pode estar em diferentes estágios desse caminho. Um caminho de causa-e-efeito mostra a relação causal entre a intervenção ambiental e seus efeitos potenciais. Os estágios do caminho são o ponto médio e o ponto final, podendo também ser utilizada uma combinação dos dois (BARE et al., 2000; DREYER et al., 2003; BARE e GLORIA, 2008; ISLAM, 2021). Výtisk et al. (2019) destacam que um modelo de caracterização pode mudar para a mesma categoria de impacto, ou seja, o fluxo pode ser avaliado por um indicador de ponto médio ou de ponto final dentro da mesma categoria de impacto.

A caracterização de causa-e-efeito ambiental com indicador de ponto médio utiliza uma substância de referência na análise da capacidade de um fluxo (de emissões ou de consumo) causar danos ambientais à substância de referência, dentro de uma categoria de impacto específica. Os resultados de ponto médio podem ser normalizados para comparação com pontos médios de outras categorias de impacto. Os indicadores de ponto médio estão mais próximos dos dados de inventário (GOEDKOOOP et al., 2009; WIDOK et al., 2012; VÝTISK et al., 2019; SAADE et al., 2020), e a norma ISO 14040 (2006) orienta o uso de indicadores de ponto médio em estudos de comparação.

A caracterização de ponto final representa os efeitos finais mensuráveis e observáveis de uma sequência de fenômenos físico-químicos relacionados aos fluxos de materiais e de energia. Esse tipo de caracterização possui alto nível de incerteza devido à simplificação de fenômenos complexos e utilização de modelos matemáticos complexos para converter os resultados de ponto médio em resultados de ponto final. Os indicadores de ponto final têm a mesma unidade e podem ser somados e comparados entre si. Para exemplificar, a categoria de impacto aquecimento global tem o indicador de aumento na temperatura do oceano como um indicador de ponto final. Indica-se, para estudos de ponto final, a apresentação dos indicadores de ponto médio para complementar a interpretação dos resultados (BARE et al., 2000; ISO 14044, 2006; BARE e GLORIA, 2008; GOEDKOOOP et al., 2009; VÝTISK et al., 2019; SAADE ET AL., 2020).

Com os resultados obtidos na etapa de caracterização, pode ser realizada a etapa de normalização, na qual os resultados da etapa anterior são comparados com um valor de referência, unificando a unidade de medida de todos os indicadores. A

normalização é realizada para comparação entre pontos médios de diferentes categorias de impacto. A LCIA é finalizada com a multiplicação dos indicadores por fatores de ponderação, para definir a importância das categorias de impacto e a obtenção de uma pontuação única de impacto ambiental. A ponderação também pode ser realizada em pontuações não normalizadas, oriundas da etapa de caracterização (ISO 14044, 2006; VÝTISK et al., 2019; SIMAPRO, 2022). A necessidade de execução das etapas de normalização e de ponderação é avaliada na aplicação da LCIA.

Com os resultados da LCIA é realizado um processo de interpretação para identificar questões significativas resultantes das etapas de LCI e LCIA. A interpretação dos resultados de LCIA deve considerar análises de sensibilidade a partir de mudanças de parâmetros do sistema de produto e análises de incertezas (ISO 14044, 2006). A análise de sensibilidade de mudança em dados, parâmetros ou premissas do modelo, é utilizada para identificar a relevância dos mesmos nos resultados do estudo. Saltelli et al. (2021) afirmam que a robustez das conclusões sobre um modelo original deve ser testada para mudanças nas suposições e/ou características iniciais de um modelo.

A propagação de incertezas até os resultados de uma LCA pode ocorrer devido à variabilidade e incerteza dos dados de entrada, escolha de modelos LCI e LCIA, variações espaciais (diferentes locais) e temporais (diferentes momentos de coleta) dos dados de entrada, informações incompletas e limites do sistema (ISO 14044, 2006; GUO e MURPHY, 2012; SAADE et al., 2020). A análise de incertezas dos resultados e dos parâmetros da LCA é conduzida por uma análise estatística selecionada durante a aplicação do método. Procedimentos detalhados de análises de incerteza e sensibilidade em estudos de LCA são apresentados em Lloyd e Ries (2007) e Guo e Murphy (2012).

Ao final desta etapa os resultados de impacto ambiental das configurações AM-HUB e AM-CLUSTER são analisados em relação às expectativas discriminadas na literatura sobre a implementação da tecnologia aditiva no ponto de uso do item produzido ou próximo dele. A literatura indica resultados de maior rapidez na entrega (desde o pedido até a entrega para os clientes), redução de emissões relacionadas ao transporte e redução de consumo de energia e do impacto ambiental na distribuição de itens (MOURTZIS et al., 2013; CHEN et al., 2015; CERDAS et al., 2017a; DESPEISSE et al., 2017; PENG et al., 2018; ZANONI et al., 2019; DEN BOER et al., 2020; CHADHA et al., 2022). A comparação dos resultados das diferentes

configurações de produção e distribuição permite avaliar o impacto do parâmetro crítico 'localização do local de produção em relação ao local de uso/consumo'.

4.4 Integração dos Módulos DES e LCA

A integração DES-LCA amplia a avaliação possível que cada técnica permite individualmente, incorporando uma avaliação dinâmica e temporal do desempenho ambiental do sistema considerado. Com a incorporação de efeitos dependentes do tempo na análise do desempenho ambiental, o modelo gerará informações para tomadas de decisão mais acuradas.

A variabilidade e as incertezas nos resultados de impacto ambiental orientam que a avaliação do ciclo de vida de um produto e a análise da severidade dos impactos ambientais incorporem o comportamento dinâmico do sistema real avaliado. Desta forma, a variação da eficiência de operações produtivas e logísticas é integrada aos resultados ambientais, permitindo identificar a variação dos impactos e os picos negativos dos impactos dentro de um período de funcionamento do sistema analisado.

A integração dos resultados da etapa de LCIA no DES é realizada pela programação de equações que representam os resultados dos indicadores de desempenho ambiental - definidos na etapa de 'Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo' - em relação a uma variável dinâmica no simulador DES (tempo de operação, tempo de transporte, consumo de materiais e/ou consumo de energia). Desta forma, com a variação de tempos e consumos no simulador, pode-se gerar resultados variáveis nos indicadores de desempenho ambiental.

Após a programação e ajustes do modelo computacional é realizada a análise dos resultados da simulação do modelo integrado DES-LCA e a comparação com resultados da DES e da LCA aplicadas de forma individual. A comparação neste caso é em relação a diferenças dos resultados de impacto ambiental com um modelo estático LCA e com um modelo dinâmico DES-LCA.

4.5 Avaliação do método proposto

A etapa de avaliação do método proposto objetiva analisar as etapas do método em relação aos objetivos do trabalho, identificando as necessidades de ajustes e melhorias nas diferentes etapas. Nesta etapa também são retomadas as limitações

do estudo para avaliação dos resultados e das interpretações realizadas na aplicação do método. A avaliação do método proposto aborda: (i) a aplicação das etapas individuais discriminadas na Figura 4.2, (ii) os resultados das etapas do método e (iii) os benefícios da integração dos módulos DES e LCA.

Na avaliação das etapas individuais do método são considerados os fluxos de informações e dados utilizados, para análise da relevância dos mesmos e identificação da necessidade de complementações de entradas. As saídas das etapas também devem ser avaliadas em termos de representatividade e coerência com os objetivos e escopo do estudo. O objetivo do estudo orientará a avaliação, pois o método proposto deve permitir a comparação dos resultados de desempenho ambiental de diferentes configurações de um Sistema de Produção com AM, identificando potenciais melhorias com a incorporação da simulação computacional para análise do sistema.

A simulação deve ser avaliada em relação à agregação de dados e informações de diferentes cenários de demanda e de eficiência nas operações e transportes e, conseqüentemente, no ganho desta complementação para a análise do desempenho operacional e ambiental das diferentes configurações. A LCA deve ser avaliada em relação à confiabilidade, completude, transparência e compreensibilidade do processo e dos resultados (ISO 14040, 2006). Além disso, os procedimentos utilizados devem ser avaliados criticamente em relação a sua consistência e embasamento teórico. A aplicação da simulação computacional e da LCA devem seguir etapas obrigatórias para uma avaliação adequada do processo operacional e de seu desempenho ambiental, respectivamente.

Em relação aos resultados gerados nos diferentes módulos do método proposto, a principal ação nesta etapa é avaliar como os resultados gerados nos módulos DES, LCA e DES-LCA, para as diferentes configurações (AM-HUB e AM-CLUSTER), impactam na tomada de decisão sobre uma configuração quando o desempenho ambiental é prioridade no processo.

Na avaliação da integração DES-LCA, o foco é na identificação dos benefícios obtidos em comparação com uma aplicação de LCA sem o apoio de simulação computacional DES. A dinâmica temporal do processo produtivo, incorporada pelo módulo DES na avaliação do desempenho ambiental, é um ponto de análise importante dentro da identificação dos benefícios reais da integração.

A avaliação do método também aborda o detalhamento das limitações de aplicações futuras do mesmo e a possibilidade de generalização dos resultados para outros cenários de aplicação de AM e/ou para outras tecnologias. E a questão final abordada na avaliação é se o estudo de desempenho ambiental realizado poderá apoiar empresas, governos e outros setores sociais nas decisões sobre adoção da AM dentro de uma crescente demanda de descarbonização das indústrias e processos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para testar o modelo DES-LCA proposto, foi realizada a análise e simulação de um sistema real. O Sistema de Produção com AM selecionado como estudo de caso funcionou de forma temporária, durante a pandemia de COVID-19.

A pandemia do COVID-19 demandou o desenvolvimento de sistemas de fabricação e redes de abastecimento flexíveis e resilientes para manter a sustentabilidade econômica e social em um cenário de rupturas de fornecimento. As rupturas impactaram na capacidade de produção de inúmeras indústrias e nos mecanismos de distribuição entre fornecedores/produtores e clientes. Na área da saúde a exigência foi em relação à velocidade nas entregas para a continuidade nos serviços de atendimento. Dentre os itens com alta demanda estavam ventiladores mecânicos, luvas, protetores faciais (*face shields*), máscaras e desinfetantes (KUMAR et al., 2020).

O processo aditivo selecionado estava localizado no Centro de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico da PUCRS (IDEIA-PUCRS), e organizado como um *hub* de processo aditivo para atender demandas de produção de *face shields*. O *hub* foi estruturado especificamente para a produção desses itens, que têm a função de proteger os usuários contra respingos de tosse e espirros na direção do rosto, minimizando os riscos de contaminação por gotículas. Destaca-se que o *hub* funcionou com apoio de entidades que doaram insumos e valores para a compra de materiais. A produção foi toda doada para a comunidade acadêmica, hospitais e sociedade, com o intuito de contribuir, principalmente, com as condições de trabalho de profissionais da saúde e no combate à pandemia de COVID-19.

O IDEIA-PUCRS apoiou o presente estudo disponibilizando dados e informações sobre o produto e seus componentes (especificações e materiais), sobre a demanda do produto (pedidos, solicitantes e entregas) e sobre o processo produtivo (tempos das operações). O estudo também teve apoio do Laboratório de Eficiência

Energética da PUCRS (LABEE-PUCRS) e do Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais da PUCRS (IPR-PUCRS). O LABEE-PUCRS forneceu um estudo sobre o consumo de energia de operações de impressão e de corte de peças dos equipamentos do IDEIA-PUCRS, e o IPR-PUCRS disponibilizou o *software* de LCA para realização da pesquisa. Nas seções a seguir são detalhadas as etapas de desenvolvimento e aplicação do modelo DES-LCA proposto.

5.1 Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo

O estudo tem como objetivo a caracterização e quantificação do comportamento operacional e ambiental de um Sistema de Produção organizado em duas configurações de fluxos de materiais: (i) uma com a centralização da produção em um *hub* de AM (AM-HUB) e (ii) outra com a descentralização da fabricação do produto, com impressoras AM para atendimento de um *cluster* de clientes (AM-CLUSTER).

O estudo de caso foi desenvolvido para demonstrar como a configuração de um Sistema de Produção com AM (localização do processo aditivo e dinâmica de atendimento da demanda) impacta no desempenho ambiental dos processos envolvidos dentro do escopo definido, que no caso do estudo é do portão ao portão (*gate-to-gate*) incluindo a distribuição dos produtos. As principais fases do ciclo de vida incluem fornecimento de matéria-prima, fabricação de componentes, montagem e distribuição do produto.

O estudo se destina a tomadores de decisão que avaliam a aplicação de tecnologias de AM em Sistemas de Produção, ou seja, empresas, empreendedores e instituições interessadas na definição da configuração de aplicação de AM ou da substituição de tecnologias subtrativas por aditivas. A partir da avaliação do desempenho ambiental dentro do escopo definido, é possível analisar e definir estratégias, de produção e logística, para cenários semelhantes ao estudado. As seções a seguir discriminam as informações que complementam a etapa de 'Definição do(s) Objetivo(s) e Escopo'.

5.1.1 Descrição do produto analisado e tecnologia de AM

O *design* do produto final (Figura 5.1) foi desenvolvido e validado pela equipe IDEIA-PUCRS, a partir de um modelo de referência da Prusa *Face Shield* (PRINTABLES, 2023). A equipe IDEIA-PUCRS trabalhou no ajuste do *design* das peças impressas, nas especificações do produto final definido, na seleção de material e na definição das tecnologias e do processo de produção. O modelo de referência foi adaptado para uma impressão mais rápida, redução de pontos de fragilidade nas peças e redução de operações de acabamento.



Figura 5.1 - Fotos do produto

Fonte: IDEIA-PUCRS

O produto foi projetado com duas peças impressas (Figura 5.2) com filamento de ácido poliláctico (PLA), acopladas em um visor para proteção da face, de polietileno tereftalato glicol (PETG), e com uma fita elástica, composta por 59% poliéster e 41% elastodieno, encaixada em uma das peças impressas para fixação em torno do crânio do usuário. O PLA é um dos polímeros termoplásticos mais utilizados nas impressões com Modelagem por Deposição Fundida (*Fused Deposition Modeling – FDM*) e não necessita de mesa aquecida para impressão (DUL et al., 2016; BESKO et al., 2017; COLORADO et al., 2020; MANGLA et al., 2023). Informações sobre características do polímero podem ser obtidas em: Brito et al. (2011), Besko et al. (2017), Valerga et al. (2018), INMETRO (2021) e Sharma e Rai (2022). Detalhes sobre os materiais PETG,

poliéster e elastodieno são apresentados em Dolzan (2004), Dupaix e Boyce (2005), Singh et al. (2018) e INMETRO (2021).

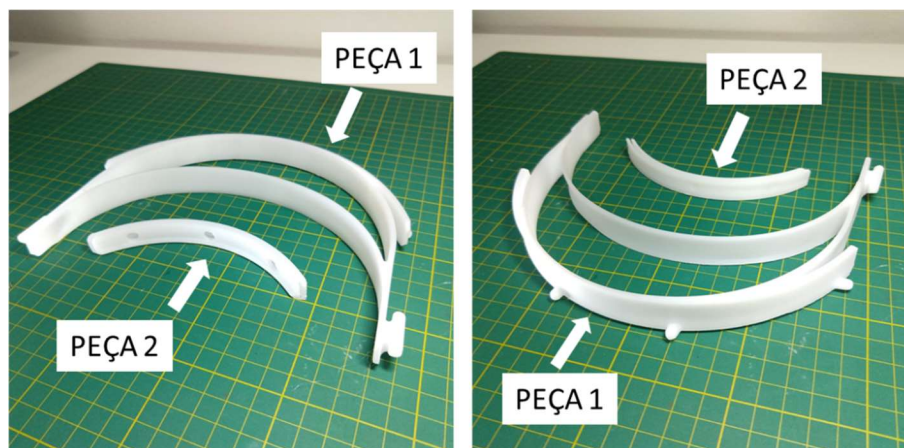


Figura 5.2 - Fotos das peças impressas

Fonte: IDEIA-PUCRS

A Peça Tipo 1, que vai em contato com a pele do usuário, tem dimensões de 191mm x 144mm x 20mm (comprimento x largura x altura). A Peça Tipo 2, que serve de suporte na parte inferior do visor e tem como função proporcionar maior estabilidade no uso do *face shield*, tem dimensões de 121,4mm x 31mm x 13mm (comprimento x largura x altura). Os visores de PETG têm dimensões de 240 mm x 240 mm x 0,5 mm (comprimento x altura x espessura); e a fita elástica tem 260 mm x 18 mm x 0,9 mm (comprimento x largura x espessura).

As duas peças impressas foram produzidas com tecnologia FDM. Uma das aplicações específicas da FDM, durante a pandemia, foi a produção de *face shields* (AMIN, et al., 2020; LARRAÑETA et al., 2020; NEIJHOFT et al., 2020; SHOKRANI et al., 2020). A FDM é uma tecnologia baseada em extrusão, na qual um filamento de um polímero é extrudado acima de sua temperatura de transição vítrea ou de fusão. Por meio de um bocal aquecido, o polímero, em estado semilíquido, é depositado em uma plataforma, camada por camada, para esfriamento, solidificação e formação da geometria final do item impresso (BIKAS et al., 2016; DUL et al., 2016; SINGH et al., 2017; VAHABLI e RAHMATI, 2017; PRAKASH et al., 2018 YOSOFI et al., 2018).

No *hub* do IDEIA-PUCRS foram utilizadas 18 impressoras FDM, com especificações apresentadas na Tabela 5.1. A disponibilidade do conjunto de impressoras variou de 80 a 50% em função de paradas de manutenção. Ou seja, o *hub* trabalhou com o máximo de 14 impressoras em funcionamento ao mesmo tempo

e com um mínimo de 9 impressoras. As impressoras foram utilizadas para a produção das Peças Tipo 1 e Tipo 2, com exceção das três impressoras Sethi3D, que foram utilizadas somente na impressão da Peça Tipo 1, e das duas impressoras Cliever CL1, que foram utilizadas somente na impressão da Peça Tipo 2.

Tabela 5.1 - Impressoras e dimensões de impressão

MARCA	MODELO	QUANTIDADE DE IMPRESSORAS	LARGURA E PROFUNDIDADE DA MESA DE IMPRESSÃO (mm)	ÁREA DE IMPRESSÃO (mm ²)	ALTURA DE IMPRESSÃO (mm)	VOLUME DE IMPRESSÃO (mm ³)
Dremel	Digilab 3D20	1	485mm(L) x 335mm(P)	162.475	390	63.365.250
Cliever	CL 2 Pro Plus	1	300mm(L) x 230mm(P)	69.000	450	31.050.000
Cliever	CL 1	2	180mm(L) x 180mm(P)	32.400	100	3.240.000
Cliever	CL 1 Black Edition	2	180mm(L) x 180mm(P)	32.400	100	3.240.000
Cliever	CL 2 Pro	3	230mm(L) x 230mm(P)	52.900	200	10.580.000
Creality	Ender 3	5	220mm(L) x 220mm(P)	48.400	250	12.100.000
GTMAX3D	CORE A1V2	1	300mm(L) x 200mm(P)	60.000	300	18.000.000
Sethi3D	S3	3	270mm(L) x 270mm(P)	72.900	320	23.328.000

Fonte: Sistema Grande Ideia do IDEIA-PUCRS

As especificações das matérias-primas, componentes, fornecedores e tecnologia de AM utilizada foram definidas pela equipe do IDEIA-PUCRS. A cadeia de fornecimento compreendia distribuidores de filamentos de PLA, de folhas PETG e de fitas elásticas. No Quadro 5.1 são discriminadas as matérias-primas e componentes utilizados, detalhando dimensões dos itens e informações de fornecimento. Em relação aos transportes de matérias-primas, foram utilizados veículos de carga de pequeno porte movidos a diesel. A equipe do IDEIA-PUCRS definiu um fornecedor referência para cada item, mas várias empresas e doadores pessoas físicas forneceram matérias-primas, sendo que não foram registradas todas as entregas discriminando fornecedor e quantidade fornecida.

Quadro 5.1 - Dimensões e informações sobre fornecimento

MATÉRIAS-PRIMAS E COMPONENTES	ESPECIFICAÇÕES	UNIDADE DE COMPRA PADRÃO	FORNECEDORES REFERÊNCIA
Filamento de PLA	1,75 mm de diâmetro	Bobinas de 1 kg	Fornecedor A - Novo Hamburgo – RS – 43 km do AM-HUB
Folha de PETG incolor e transparente	0,5 mm de espessura 2.440 mm de comprimento 1.200 mm de largura	Kit com 20 folhas	Fornecedor B - Porto Alegre – RS – 8,6 km do AM-HUB
Fita elástica branca	0,9 mm de espessura 18 mm de largura	Rolo de 25 m	Fornecedor C - Gravataí – RS – 24,2 km do AM-HUB

Fonte: IDEIA-PUCRS

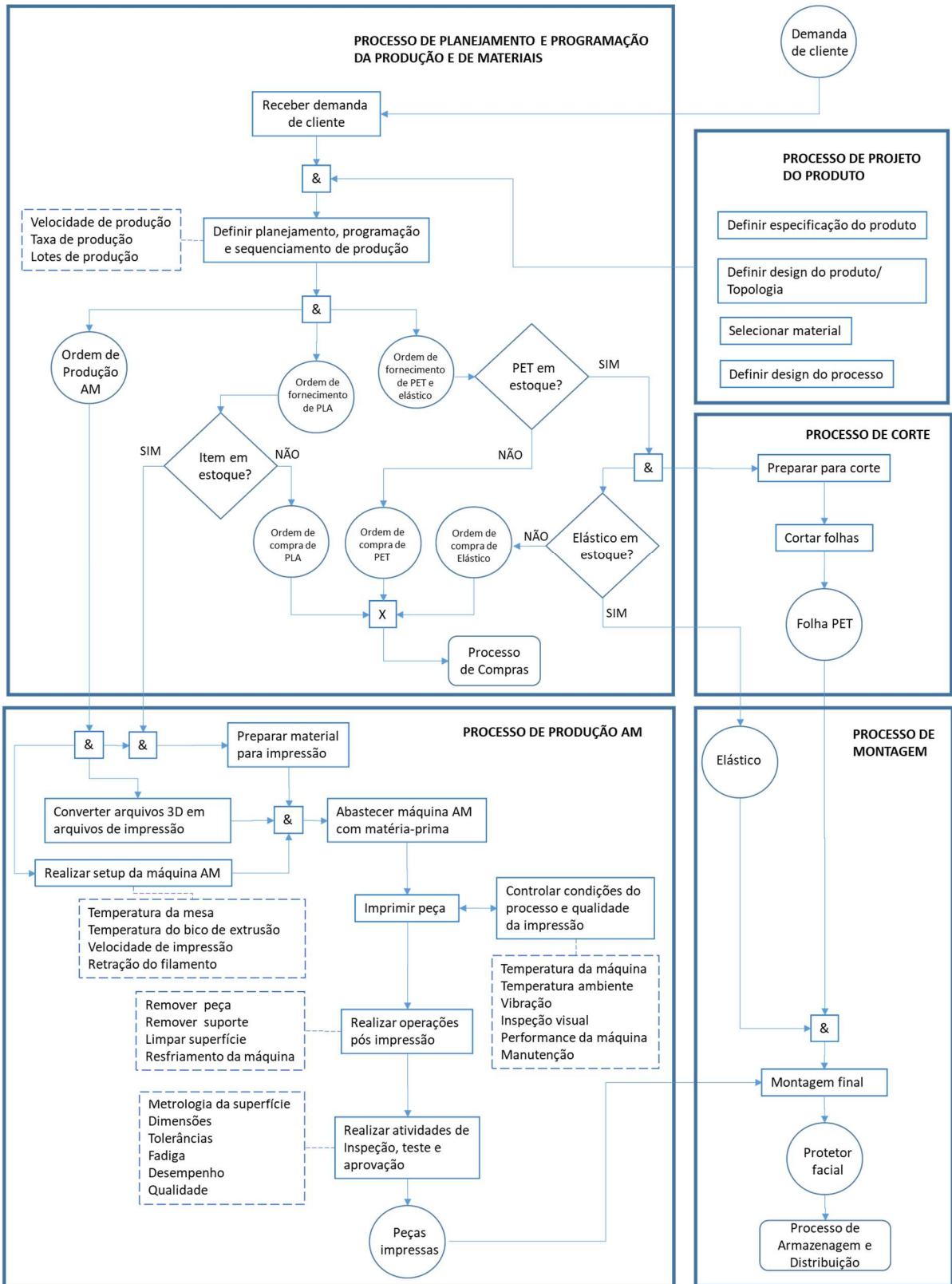
5.1.2 Descrição dos processos analisados

O fluxo de planejamento, programação, produção e montagem é composto por etapas de processamento de materiais e de informações para o atendimento da demanda. Na Figura 5.3 são discriminados o recebimento das demandas, o projeto do produto, o planejamento e programação da produção e de materiais, a produção AM, o processamento de corte, a montagem final e o armazenamento.

As demandas e o projeto do produto eram as informações de entrada do processo de Planejamento e Programação de Produção e de Materiais. O processo de Projeto do Produto disponibilizava o arquivo 3D das peças, bem como as especificações de processamento dos outros componentes do produto final. As demandas continham informações das quantidades demandadas e dos demandantes.

Os dados e informações de demanda e programação da produção de protetores faciais foram organizados em um sistema de controle denominado Grande Ideia. Este sistema foi desenvolvido no IDEIA-PUCRS, utilizando um *framework* de código aberto para prototipagem de sistemas de informação (VIANNA et al., 2021). As informações sobre tempos de produção, consumo de materiais e geração de resíduos foram fornecidos pela equipe IDEIA-PUCRS e/ou obtidos no sistema Grande Ideia.

No Quadro 5.2 estão compilados os processamentos realizados nas diferentes entidades (filamentos, folhas de PETG e fita elástica) e os recursos utilizados, a partir das ordens de produção e de compras geradas no processo de Planejamento e Programação de Produção e de Materiais. Nesse processo a equipe IDEIA-PUCRS definia o momento de início da produção em função da disponibilidade das matérias-primas em estoque, dos prazos de entrega definidos em função de solicitantes prioritários e das filas de produção no momento da programação. Se havia disponibilidade de matérias-primas, eram geradas ordens de produção para impressão AM e/ou ordens de fornecimento para o Corte e para a Montagem. Os filamentos de PLA eram disponibilizados para o processo de produção AM; as folhas de PETG eram fornecidas para o processo de Corte; e as fitas elásticas eram cortadas e encaminhadas para o processo de Montagem. Nos casos de necessidade de reposição de estoques de matérias-primas, eram geradas ordens de compra e encaminhadas para os responsáveis pelo processo de compras, que não foi abordado e detalhado no presente estudo.



& Representa junção ou separação obrigatória

X Representa entradas e saídas alternativas

Figura 5.3 - Fluxo de planejamento, programação, produção e montagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quadro 5.2 - Entidades, processamentos e equipamentos

ENTIDADE	PROCESSAMENTO	RECURSOS
Peça 1	Impressão 3D	Impressoras e Operadores
Peça 1	Remoção de rebarbas	Furadeira de bancada Motomil Modelo FBM-160i e Operador
Peça 2	Impressão 3D	Impressoras e Operadores
Folha de proteção facial	Corte manual	Gabarito, Tesoura e Operador
Folha de proteção facial	Corte automatizado	LaserCNC 130 W Modelo CMA 1008 e Operador
Fita elástica	Corte manual	Gabarito, Tesoura e Operador
Protetor Facial	Montagem e Inspeção	Operadores

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

No processo de produção AM, os arquivos das peças para impressão, que foram gerados no *software* PTC Creo Parametric 6.0, eram convertidos para arquivos de impressão usando o *software* Simplify3D 4.0 (*slicer*). Os arquivos de impressão continham informações para ajustes das impressoras e do processo de deposição do polímero: posição e diâmetro do bocal de extrusão, limite de peso, dimensões horizontal e vertical da peça e espessura da camada depositada.

No processo de produção AM, um colaborador operou o *hub* de impressoras em cada turno de trabalho. As impressoras ficavam imprimindo o máximo de tempo possível e os técnicos eram responsáveis por iniciar o processo de impressão, acompanhar o início da impressão e retirar as peças das impressoras. Quando necessário, o *hub* funcionou 24 horas e durante os 7 dias da semana.

Antes da impressão eram realizadas operações de preparação das máquinas e dos filamentos de PLA. Os filamentos de PLA passavam por desumidificação em equipamentos específicos, mas em alguns momentos do período de produção não houve tempo para esta etapa e as bobinas de filamentos foram utilizadas nas condições em que foram entregues.

Na impressão foi usado um adesivo para garantir que a peça não soltasse da mesa durante a impressão. O adesivo era colocado na mesa antes do aquecimento e a substituição do adesivo foi a cada 6 impressões, exigindo a lavagem da mesa com água e limpeza com álcool isopropílico ou álcool de cereais. A substituição de adesivo demorava, em média, 10 minutos.

As impressoras do *hub* eram ajustadas em relação à: temperatura da mesa (60°C), temperatura de extrusão (210°C), velocidade de impressão (50mm/s), velocidade de impressão dos perímetros (40mm/s) e retração de filamento. Segundo a literatura, a mesa de impressão com PLA pode ficar com temperatura entre 0 e 80°C;

já a extrusão deve ser ajustada para uma temperatura entre 190 e 220°C (MANGLA et al., 2023).

O tempo de configuração do *software* Simplify3D 4.0 variou de 10 a 15 minutos, sendo que a configuração era realizada uma vez por semana. O 'start' de impressão considerava a seleção dos comandos de posicionamento e de liberação de material, o aquecimento da impressora e o acompanhamento da impressão da primeira camada. Desta forma era garantida a qualidade da impressão ou era realizado um descarte rápido de peças que iniciavam a impressão fora dos parâmetros definidos. O tempo médio de 'start' de impressão variou entre 5 e 10 minutos para as impressoras, com exceção das impressoras da marca Cliever, que demandaram entre 30 e 40 minutos para essa operação.

Os lotes de impressão não eram padronizados, dependendo da demanda, prazos de entrega e da capacidade da impressora utilizada, mas sempre priorizando a maior quantidade de peças por lote de impressão. Para exemplificar, na Figura 5.4 são apresentadas configurações de impressão consideradas padrão no AM-HUB.

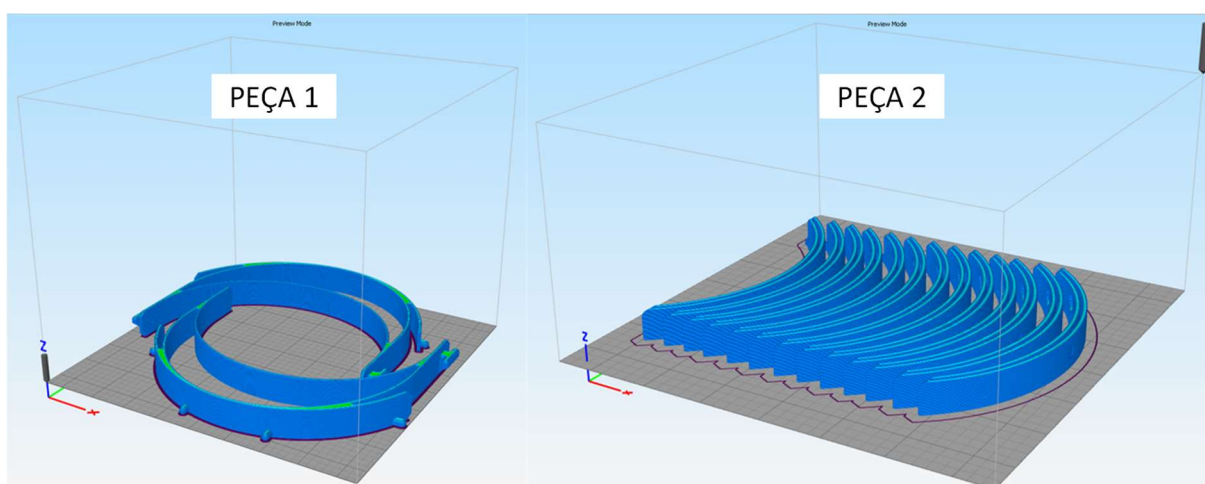


Figura 5.4 – Imagens do arquivo de impressão gerado no Simplify3D 4.0

Fonte: Sistema Grande Ideia do IDEIA-PUCRS

As peças do Tipo 1 eram impressas em lotes de 2 peças por vez, o que foi definido como padrão de impressão para esse tipo de peça no presente estudo. As peças do Tipo 2 eram impressas em lotes variados, mas o mais utilizado foi o de 13 peças (Figura 5.4), utilizado como padrão no estudo. A velocidade de impressão também variou em função das impressoras, que tinham acelerações e velocidades diferentes, e dos prazos de entrega definidos no planejamento de produção.

A Peça Tipo 1 consumiu, em média, 46,83 g de filamento, com um tempo médio de produção de 320 min/batelada, sendo a batelada padrão do ciclo (*job*) definida em 2 peças por impressão. A produção da Peça Tipo 1 foi o gargalo do processo produtivo analisado. A Peça Tipo 2 consumiu, em média, 9,04 g de filamento, com um tempo médio de produção de 350 min por batelada de 13 peças.

O carregamento das bobinas de filamentos nas impressoras foi orientado pela taxa de consumo/impressão. Em média, as impressoras consumiram uma bobina de 1kg a cada 2 dias. O processo de troca da bobina levava, em média, 10 minutos (retirada da bobina vazia e instalação da nova bobina).

Após o ciclo de impressão, as peças eram resfriadas à temperatura ambiente e era realizada a remoção de resíduos. Os resíduos foram gerados devido ao consumo de filamentos para a impressão do contorno adicional (que não tem contato com a peça) na primeira camada de impressão – o que garante a homogeneidade na extrusão do filamento – e por imperfeições na superfície da peça. As Peças Tipo 1, por ficarem em contato com a pele do usuário dos *face shields*, necessitaram, em 90% dos casos, de remoção de rebarbas.

O tempo médio de limpeza das peças do Tipo 1 foi de 1 min/item, ou seja, uma taxa de produção média de 60 itens/hora. Foi identificada uma perda média de 4% como resíduos, o que equivale a 1,87 g do total de filamento usado para a produção de uma peça. A produção semanal de referência foi de 574 peças do Tipo 1, com a utilização da capacidade máxima disponível, e com um consumo de 26,88 kg de filamento por semana. Considerando a produção de referência, estimou-se a geração semanal de 1,075 kg de resíduos.

As peças do Tipo 2 geraram 0,1% de perdas do material utilizado. A produção semanal de referência também foi de 574 peças, com um consumo de 5,2 kg de filamento por semana. Considerando a produção de referência, estimou-se a geração semanal de 0,052 kg de resíduos.

Os resíduos foram descartados para o sistema de coleta seletiva convencional, mas poderiam ser encaminhados para reciclagem. Outro resíduo do processo de AM são as bobinas de filamentos de PLA, que foram descartadas como sucata para reaproveitamento em outras unidades da Universidade e para uma instituição externa.

Uma inspeção visual e sensorial orientava a aprovação da peça para a montagem do produto. As peças não conformes eram classificadas para descarte ou para retrabalho. A taxa de não conformes foi de 2% da produção final, sendo que 50%

dos itens classificados como não conformes puderam ser retrabalhados e reaproveitados na montagem dos produtos finais.

O processo de fabricação do visor para a proteção facial iniciava no corte de folhas de PETG. As folhas de PETG passaram pelo processo de ajuste de tamanho para carregamento na máquina de corte a laser. O ajuste era feito manualmente pelos técnicos (tempo médio de 5 minutos/folha), que recebiam folhas de 2.440 mm de comprimento por 1.200 mm de largura e ajustavam para 1.000 mm de comprimento por 800 mm de largura. O ajuste era necessário em função da área de trabalho da máquina utilizada, uma Laser CNC 130 W Modelo CMA 1008. A máquina era operada por um colaborador em um turno de 4 horas, sendo que o corte era realizado somente em 1 turno (manhã). Durante o período de produção de *face shields* a máquina ficou dedicada para o corte das folhas, sendo que um *setup* inicial foi realizado (2 minutos), ajustando o foco do laser (distância entre a ponteira e o material cortado), a potência do laser e o avanço de corte. O técnico que atuou no processo de corte estimou um tempo médio de 1 minuto para descarregamento dos protetores, carregamento de uma nova folha e inicialização do corte.

Cada folha original (2.400 mm x 1.200 mm, com 1,93 kg) deu origem a 3 folhas (1.000 mm x 800mm) e uma sobra de material que permitiu a produção de 4 visores. Cada folha de 1.000 mm x 800mm permite a produção de 12 visores, sem sobras. Desta forma, cada folha de PETG comprada permite a produção de 40 visores (com dimensões de 240 mm x 240 mm). O tempo médio de corte de uma folha foi de 7 minutos, ou seja, para a produção de cada lote de 12 visores. A equipe IDEIA-PUCRS estimou que 5% da folha original foi descartada em lixo seletivo (resíduo gerado por operações de arredondamentos e de furação nas folhas). Considerando as dimensões de uma folha original e o peso específico do PETG - de 1,32 g/cm³, segundo a ASTM D792 (2013) - foi estimada uma perda de 0,095 kg de PETG por folha original. Após o corte os visores eram encaminhados para o processo de montagem.

Na montagem as peças impressas eram conectadas nos visores de proteção facial e uma fita elástica era encaixada na Peça Tipo 1. As fitas elásticas foram adquiridas do fornecedor com os furos de encaixe, mas eram cortadas manualmente em tiras de 26 cm de comprimento, com uma taxa de produção média de 200 unidades/hora. A montagem foi realizada por dois colaboradores com uma taxa de produção média de 1,33 unidades/minuto (80 unidades/hora), produzindo em média 500 protetores em um tempo disponível de 6,25 horas/dia. Na Tabela 5.2 os tempos

de ciclo das atividades são compilados com as frequências de execução das atividades.

Tabela 5.2 – Tempos de ciclo e frequência das atividades operacionais de produção de *face shields*

ATIVIDADE	Tempo de ciclo (min)			Frequência de execução
	Mínimo	Médio	Máximo	
Aplicação/substituição de adesivo	9	10	12	A cada 6 <i>jobs</i> de impressão
Preparação computacional para impressão	10	12	15	Uma vez por semana
"Start" de impressão - impressoras Cliever	30	35	40	A cada <i>job</i>
"Start" de impressão - outras impressoras	5	7,5	10	A cada <i>job</i>
Troca de bobina de filamento	7	10	12	A cada 2 dias
Impressão de Peça Tipo 1	300	320	360	A cada <i>job</i>
Impressão de Peça Tipo 2	300	350	420	A cada <i>job</i>
Limpeza e acabamento do lote de peças do Tipo 1	1	2,5	4	A cada <i>lote</i> de 2 peças
Ajustes folha de PETG	4	5	7	A cada carregamento
Setup da máquina de corte	1,80	2	2,20	Uma vez por dia
Carregamento e "start" da máquina de corte	0,85	1	1,10	A cada batelada
Operação da máquina de corte	6	7	9	A cada batelada
Montagem e inspeção final do <i>face shield</i>	0,65	0,75	0,90	A cada kit de montagem disponível

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após uma inspeção dos produtos finalizados, os itens eram armazenados em uma área para separação e preparação dos lotes para entrega. A retirada dos itens no local de produção, manuseio, embalagem e o transporte até o local de uso eram de responsabilidade do demandante, sendo que os transportes forem realizados com veículos leves. O *hub* foi organizado somente para a execução das tarefas de produção e montagem.

5.1.3 Descrição das demandas e demandantes

A demanda do cliente é a informação que inicia o processo de Planejamento, Programação e Controle da Produção e de Materiais. Na Tabela 5.3 são apresentados os dados de demanda agregada no período analisado por demandante, o número de pedidos e as distâncias do *hub* até os clientes. Os dados coletados para a análise do sistema englobam pedidos realizados no período entre março de 2020 e fevereiro de 2021, e entregues até maio de 2021. Os pedidos totalizaram 16.219 unidades de *face shields*.

Tabela 5.3 - Dados agregados de demanda, pedidos e distância entre o *hub* e o demandante

Demandante	Demanda (unidades)	Quantidade de pedidos	Distância até o <i>hub</i> (km)	Município
Instituição 1	30	1	3,9	Porto Alegre
Instituição 2	30	1	11,7	Porto Alegre
Instituição 3	40	1	9,2	Porto Alegre
Instituição 4	50	1	10,4	Porto Alegre
Instituição 5	25	1	2,3	Porto Alegre
Instituição 6	20	1	9,7	Porto Alegre
Instituição 7	46	2	6,5	Porto Alegre
Instituição 8	130	2	9,3	Porto Alegre
Instituição 9	80	1	6,8	Porto Alegre
Instituição 10	10	1	20,9	Eldorado do Sul
Instituição 11	10	1	8,2	Porto Alegre
Instituição 12	20	1	4,9	Porto Alegre
Instituição 13	20	1	11,5	Porto Alegre
Instituição 14	30	1	6,6	Porto Alegre
Instituição 15	7	1	10,6	Porto Alegre
Instituição 16	25	1	5,9	Porto Alegre
Instituição 17	30	1	10,3	Porto Alegre
Instituição 18	150	2	7,3	Porto Alegre
Instituição 19	60	1	6,3	Porto Alegre
Instituição 20	120	2	7,4	Porto Alegre
Instituição 21	150	3	7,5	Porto Alegre
Instituição 22	30	1	6,7	Porto Alegre
Instituição 23	100	1	6,1	Porto Alegre
Instituição 24	20	1	6	Porto Alegre
Instituição 25	25	1	105	Osório
Instituição 26	15	1	5,2	Porto Alegre
Instituição 27	250	1	5,7	Porto Alegre
Instituição 28	20	1	1,9	Porto Alegre
Instituição 29	60	1	37,2	São Leopoldo
Instituição 30	60	2	3,2	Porto Alegre
Instituição 31	30	1	9,2	Porto Alegre
Instituição 32	30	2	296	Santa Maria
Instituição 33	4.093	11	14,6	Viamão
Instituição 34	7.739	29	-	-
Instituição 35	1.814	10	2,1	Porto Alegre
Instituição 36	50	4	1,8	Porto Alegre
Instituição 37	40	1	5,4	Porto Alegre
Instituição 38	20	1	3,3	Porto Alegre
Instituição 39	20	2	124	Tramadaí
Instituição 40	20	1	4,9	Porto Alegre
Instituição 41	120	1	5,8	Porto Alegre
Instituição 42	40	1	5,7	Porto Alegre
Instituição 43	65	2	9,7	Porto Alegre
Instituição 44	30	1	5,9	Porto Alegre
Instituição 45	150	1	6,6	Porto Alegre
Instituição 46	20	1	12,1	Porto Alegre
Instituição não identificada	275	7	-	-
Total	16.219	113		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Além de demandas internas de escolas e áreas administrativas da PUCRS (Instituição 34), da mantenedora da Universidade (Instituições 32 e 33), do Hospital São Lucas (Instituição 35) e do Instituto do Cérebro da PUCRS (Instituição 36), o *hub* atendeu solicitações de 41 entidades externas identificadas, em 7 municípios do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Viamão, Eldorado do Sul, São Leopoldo, Osório, Santa Maria e Tramandaí. As demandas internas correspondem a 84,63% do total atendido.

Os registros de demanda externa (15,37% do total), que equivale a 2.493 unidades de *face shields*, apresentaram um problema de identificação de solicitantes no sistema Grande Ideia: uma quantidade de 275 unidades demandadas (1,69% do total demandado), distribuídas em 7 pedidos, não tinham o destino de uso discriminado no sistema ou estavam como pedidos de pessoas físicas. Para o estudo foi considerado que esses pedidos foram realizados por demandantes internos da Universidade e foram distribuídos entre demandantes do campus central (escolas e áreas administrativas) e do campus da saúde da PUCRS (Hospital São Lucas e Instituto do Cérebro). Os dados desagregados por pedido, que discriminam o dia da demanda e o dia da disponibilização para a distribuição dos itens são apresentados no APÊNDICE B. Esses dados foram agrupados em entregas mensais e foram utilizados como parâmetros de entrada na modelagem computacional DES.

Os demandantes foram organizados em dois grupos. O grupo A com os locais de usos em um raio de até 30 km, o que corresponde a 99,17% das entregas de produtos; e o grupo B com destinos acima de 30km, com 0,83% das entregas realizadas. Os locais de destino (locais azuis) do grupo A estão indicados na Figura 5.5, sendo que o local vermelho indica o *hub* de AM.



Figura 5.5- Mapa com o *Hub* de AM (vermelho) e locais de entrega (azuis) no raio de 30 km

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Google My Maps (2024)

Considerando o grupo A, a distância média percorrida foi de 7,3 km e a distância máxima percorrida foi de 20,9 km. Considerando o grupo B, a média de distância percorrida foi 140,6 km e a distância máxima percorrida foi de 296 km. Nesse conjunto foram realizadas 6 entregas: duas em Santa Maria, uma em São Leopoldo, uma em Osório e duas em Tramandaí. Os transportes até o ponto de uso fora do campus central da PUCRS foram realizados com veículos leves movidos a gasolina e/ou etanol. As entregas no campus da saúde, onde ficam localizados o Hospital São Lucas e o Instituto do Cérebro, também utilizaram o mesmo tipo de veículo. Já as entregas dentro do campus central da PUCRS foram realizadas sem utilização de veículo.

Como no grupo A havia entregas com e sem uso de veículo, os dados de entregas de *face shields* foram organizados em entregas mensais para demandantes do Campus Central e demandantes localizados até 30 km do IDEIA-PUCRS. O grupo B foi mantido com demandantes localizados a uma distância acima de 30 km do IDEIA-PUCRS. Os dados organizados em 3 agrupamentos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Dados agregados de entregas mensais por tipo de demandante

Período	Quantidade entregue no Campus Central (unidades)	Quantidade entregue em demandantes até 30 km (unidades)	Quantidade entregue em demandantes acima de 30 km (unidades)	Demanda Total
mar/20	0	50	0	50
abr/20	115	1177	0	1292
mai/20	807	713	35	1555
jun/20	625	796	30	1451
jul/20	640	415	0	1055
ago/20	780	128	60	968
set/20	700	1584	0	2284
out/20	0	1248	0	1248
nov/20	300	500	0	800
dez/20	600	0	0	600
jan/21	800	0	0	800
fev/21	300	26	0	326
mar/21	0	0	0	0
abr/21	980	0	0	980
mai/21	810	0	0	810
jun/21	0	1000	0	1000
jul/21	0	500	0	500
ago/21	0	500	0	500
Demanda Total	7457	8637	125	16219

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5.1.4 Sistema de Produto e Unidade Funcional

O estudo tem como escopo uma análise do portão ao portão, estendido até a entrega do produto final nos usuários/demandantes. A Figura 2.1 representa o

Sistema de Produto analisado, destacando os principais fluxos na delimitação do ciclo de vida do produto analisado.

Desta forma, o estudo de LCA e a etapa de simulação computacional com DES consideram as seguintes etapas do ciclo de vida do produto: (i) entrega de matérias-primas no AM-HUB, (ii) a produção com AM e a montagem do produto e (iii) a distribuição do produto. A impressão de peças, o corte de visores, a montagem do produto final e o transporte do produto até o demandante são os principais processos no escopo do estudo.

A incorporação da etapa de desenvolvimento do produto no escopo foi avaliada e optou-se por não considerar a etapa na avaliação. A equipe do IDEIA-PUCRS adaptou um projeto já existente, o que demandou testes de impressão até a validação do produto final, mas as impressões e o consumo de material na produção das peças dos testes não foram registrados, o que dificultaria a modelagem dessa etapa.

O detalhamento de processos a montante e a jusante do AM-HUB não contribui para o objetivo do estudo de avaliar a integração da DES com a LCA, e uma análise do portão ao portão é suficiente para o estudo da integração. As produções, extrações e transportes antes do processo de fornecimento de matérias-primas para o AM-HUB foram retirados do escopo do estudo, bem como os fluxos relacionados à infraestrutura, serviços de apoio, utilização do produto e final de sua vida útil.

A unidade funcional definida no presente estudo foi entregar lotes de 26 produtos; e o fluxo de referência é de 26 *face shields*, conseqüentemente, 26 peças de cada componente da montagem do produto: Peça do Tipo 1, Peça do Tipo 2, visor e fita elástica. O lote de 26 unidades foi definido em função dos *jobs* (ciclos) de impressão das peças, uma vez que cada ciclo de impressão resulta na produção de 02 Peças Tipo 1 ou em 13 Peças Tipo 2 por impressão. Assim, para não haver sobra de peças devem ser realizados 13 *jobs* de impressão de Peças Tipo 1 e 2 *jobs* das Peças Tipo 2, resultando no fluxo de referência de 26 unidades.

5.1.5 Definição das categorias de impacto e indicadores

Como os estudos sobre AM indicam um consumo de energia considerável e as emissões de CO₂ direcionam diversos estudos comparativos entre tecnologias AM e delas com outras tecnologias, foram selecionadas as categorias de impacto 'Potencial de Aquecimento Global' (*Global Warming Potential – GWP*) e 'Demanda de Energia

Acumulada' (*Cumulative Energy Demand* – CED). Essas categorias são utilizadas na comparação entre as configurações AM-HUB e AM-CLUSTER e para a integração da DES com a LCA.

O GWP é medido em kg de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq), e considera quanto determinada massa de gases do efeito estufa pode potencialmente contribuir para o aquecimento global (GREINER, 2001; WANG et al., 2014; SAADE et al., 2020; GARCIA et al., 2021). A CED representa a quantidade de energia primária consumida durante o ciclo de vida de um produto ou serviço e usualmente é expressa em termos de MJ-equivalente (MJ-*eq*), considerando um fator de conversão entre as diferentes fontes de energia categorizadas pelo método (energias renováveis e não renováveis). Contribuem para essa categoria de impacto os indicadores relacionados ao consumo direto e indireto no atendimento de uma função, ou seja, na transformação de recursos em insumos, na geração de utilidades, na manufatura dos produtos, na destinação de resíduos, nas operações de transporte e nas alternativas de final de vida do produto (KREIGER et al., 2014; PARIS et al., 2016; TADDESE et al., 2020; Yi et al., 2020; GARCIA et al., 2021).

Outras categorias são utilizadas na avaliação de desempenho ambiental devido ao método de avaliação de impacto ambiental selecionado no *software* de LCA, sendo discriminadas na seção 5.3. Em estudos de LCA não há obrigatoriedade de escolha de todos os indicadores e/ou categorias de impacto disponíveis no método selecionado, mas deve-se selecionar e justificar aqueles que apoiam as tomadas de decisão para atender os objetivos do estudo (TADDESE et al., 2020).

Além das categorias de impacto ambiental, foi realizado um levantamento na literatura de indicadores utilizados nas perspectivas ambiental e operacional. Os indicadores foram definidos a partir da avaliação subjetiva do autor em relação à utilidade dos mesmos no estudo da dinâmica de funcionamento do sistema e na avaliação do desempenho ambiental. A decisão se baseia na utilização dos indicadores em estudos similares ao desenvolvido na Tese.

No Quadro 5.3 são compilados os indicadores selecionados no levantamento. Os parâmetros de desempenho operacional são avaliados com apoio do módulo DES, gerando informações sobre a variabilidade de volume de produção e de distribuição, consumo de energia, número de produtos fabricados, quantidade de não conformes e tempos de ciclo de produção e de entrega (PAJU et al., 2010; GBEDEDU et al., 2018b).

Quadro 5.3 – Indicadores ambientais e operacionais

PERSPECTIVA	INDICADOR	REFERÊNCIAS
AMBIENTAL	Emissões de CO ₂ na produção, em kg CO ₂ eq	(GREINER, 2001; HEILALA et al., 2008; LÖFGREN e TILLMAN, 2011; GBEDEDO et al., 2018b; PENG et al., 2018; TADDESE et al., 2020; Yi et al., 2020; RINALDI et al., 2021; SON et al., 2021; WU et al., 2022; MANGLA et al., 2023)
	Emissão de CO ₂ no transporte, em kg CO ₂ eq	(GREINER, 2001; KERAMYDAS et al., 2017 ; PENG et al., 2018; RINALDI et al., 2021; SON et al., 2021)
	Geração de Resíduos Sólidos, em kg	(HEILALA et al., 2008; OROS DARABAN et al., 2019; RINALDI et al., 2021)
OPERACIONAL	Consumo de materiais, em kg ou m ³	(KIBIRA e McLEAN, 2008; PAJU et al., 2010; GBEDEDO et al., 2018b; PENG et al., 2018; OROS DARABAN et al., 2019; TADDESE et al., 2020; SON et al., 2021; MANGLA et al., 2023)
	Consumo de energia, em kWh	(KIBIRA e McLEAN, 2008; PAJU et al., 2010; LÖFGREN e TILLMAN, 2011; GBEDEDO et al., 2018b; PENG et al., 2018; SOLAIMANI et al., 2021; SON et al., 2021; MANGLA et al., 2023)
	Quantidade produzida (tamanho do lote), em unidades	(PAJU et al., 2010)
	Quantidade de não conformes, em unidades	(GBEDEDO et al., 2018b; PENG et al., 2018)
	Tempo de produção, em minutos ou horas	(KIBIRA e McLEAN, 2008; PAJU et al., 2010; SPROEDT et al., 2015; GBEDEDO et al., 2018b; SOLAIMANI et al., 2021)
	Tempo de transporte, em minutos ou horas	(KREIGER et al. 2014; PENG et al., 2018; ARBABIAN e WAGNER, 2020; KERDLAP et al., 2022)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A emissão de carbono, representada pelo valor de CO₂ equivalente, indica a quantidade de emissão de gases do efeito estufa gerados com o material e processo produtivo estudados (KAZULIS et al., 2017). Nas operações de logística de distribuição das matérias-primas, componentes, peças e produtos finais, o desempenho ambiental é medido pela emissão de carbono no transporte, calculada com base no consumo total de combustível, considerando o tipo de veículo, o combustível utilizado, o peso total do transporte e distância entre fornecedor e cliente (PAJU et al., 2010; SON et al., 2021). Os resíduos sólidos devem ser avaliados pela quantidade gerada, por tipo de resíduo e pelo método de disposição (TADDESE et al., 2020).

As definições finais nesta etapa do método são em relação à abordagem do estudo de LCA, os eventuais critérios de alocação e critérios de corte que podem ser adotados. A abordagem atribucional foi definida para representar um sistema de produto isolado do resto da tecnosfera. No caso da análise do portão ao portão *do HUB* pode ser muito difícil compreender e modelar as consequências no mercado da introdução de uma pequena mudança no sistema de produto (BJØRN et al., 2018a).

O critério de corte é avaliado e aplicado durante as etapas de LCI e LCIA. A ISO 14044 (2006) indica critérios de percentual de massa, de volume e de energia

(poder calorífico) em relação ao produto final; e de relevância do impacto ambiental da parte analisada em relação ao impacto total. No presente trabalho, foi adotado o critério de corte, para delimitação de entradas e saídas, com base no percentual de massa abaixo de 1%. Impactos ambientais de categorias que contribuem com menos de 5% do impacto total também foram desconsiderados na análise dos resultados de LCIA. É importante ressaltar que o sistema estudado não envolve produtos energéticos, ou com potencial interesse energético, o que indica que o percentual de energia não é um critério relevante para uso no estudo.

5.2 Simulação do Sistema de Produção AM

A aplicação da simulação computacional no presente estudo – módulo DES - objetiva analisar o desempenho operacional do sistema AM em diferentes configurações: AM-HUB e AM-CLUSTER. O módulo DES permite identificar restrições nos fluxos de materiais, nas capacidades produtivas e no desempenho dos recursos utilizados. A partir da simulação do funcionamento das diferentes configurações de um processo aditivo, são gerados dados e informações para apoiar o processo de avaliação de desempenho ambiental.

5.2.1 Coleta e tratamento de dados de produção e de transporte

Nesta etapa são apresentados os dados de entrada dos modelos conceitual e computacional das diferentes configurações. Alguns dados utilizados foram apresentados nas seções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3. Nesta seção são apresentados os dados que foram tratados para definição de distribuições de probabilidade e da clusterização para uma das configurações testadas.

5.2.1.1 Definição das distribuições de probabilidade

Os dados apresentados nas seções 5.1.2 (tempos de operações) e 5.1.3 (distância entre o AM-HUB e os demandantes) orientaram a definição de distribuições de probabilidade dos tempos de produção de peças impressas, dos tempos de preparação e/ou produção de componentes, dos tempos de montagem e dos tempos de entrega de matérias-primas e de *face shields*. A utilização das distribuições de

probabilidade permite incorporar variabilidade nos tempos de transporte e das operações, simulando o comportamento dinâmico do sistema analisado. As distribuições de probabilidade foram definidas a partir de testes de aderência disponíveis no módulo estatístico StatFit do *software* de simulação DES selecionado: ProModel *Professional* versão 10.10.137.

Os tempos de entrega das matérias-primas no AM-HUB foram definidos a partir das distâncias identificadas entre o *hub* e os fornecedores (Quadro 5.1 - seção 5.1.1). As distâncias percorridas foram obtidas no *Google Maps* e as velocidades utilizadas para cálculo do tempo de deslocamento foram estimadas com base nos tempos de deslocamento fornecidos pelo *Google Maps*. Com as distâncias e velocidades máxima e mínima foram estimados os tempos de deslocamentos máximo e mínimo, respectivamente (APÊNDICE C). A partir destes valores foram geradas amostras de valores aleatórios entre os valores limites com o apoio do *software* SPSS versão 17.0 – apresentadas no APÊNDICE D – e foram definidas distribuições de probabilidade no StatFit - apresentadas no APÊNDICE E.

Os dados de transporte entre o AM-HUB e os demandantes foram tratados da mesma forma, pois foi disponibilizado um histórico de entrega com a identificação dos demandantes (seção 5.1.3 e APÊNDICE B). As distâncias entre o AM-HUB e os demandantes permitiram estimar os tempos de deslocamento máximo e mínimo, com base em referências obtidas no *Google Maps* (APÊNDICE C). No APÊNDICE D são apresentadas as amostras de tempo geradas com valores aleatórios entre os valores limites de tempo com o apoio do *software* SPSS versão 17.0. Destaca-se que os tempos de entrega dos *face shields* foram organizados em três grupos: entrega no Campus Central, entrega para demandante localizado em até 30 km do AM-HUB e entrega para demandante localizados a uma distância do AM-HUB maior do que 30 km. No APÊNDICE E são apresentadas as distribuições de probabilidade, obtidas no StatFit, para os tempos de entrega dos *face shields*.

Como no Sistema Grande Ideia não estão registrados os dados históricos de produção em relação aos tempos de preparação, produção, acabamento e montagem, foram coletados valores médio, mínimo e máximo de cada variável, em conversas com os operadores do *hub* e/ou em registros pessoais dos mesmos (os dados foram apresentados na seção 5.1.2). A falta de uma amostra de dados não permite definir a distribuição empírica dos dados, o que demanda uma ação alternativa. Amostras com valores aleatórios, entre os mínimos e máximos de cada variável, foram geradas no

SPSS versão 17.0. A partir das amostras geradas, apresentadas no APÊNDICE F, foram definidas, com o apoio do StatFit, as distribuições de probabilidade discriminadas no APÊNDICE G.

5.2.1.2 Coleta de dados para cálculo de consumo de energia

A representatividade e a importância da avaliação do consumo de energia em processos aditivos foi discutida nas seções 3.1 e 3.2, pois há muita variação na demanda energética de acordo com a tecnologia de AM utilizada, com o tempo de impressão e com a complexidade da peça (geometria e altura do item) (DUNAWAY et al., 2017; GARCIA et al., 2018). Desta forma, foi identificado no presente estudo a necessidade de um levantamento do consumo de energia na operação das impressoras utilizadas e, também, da máquina de corte.

A coleta de dados do processo real é o mais indicado para a modelagem de consumo de energia em processos produtivos (THIEDE et al., 2013). O Laboratório de Eficiência Energética da PUCRS (LABEE-PUCRS) apoiou esta etapa com medições e coleta de dados no campo, bem como cálculos de consumo. Foram coletadas informações sobre a demanda de eletricidade a partir da realização de ciclos de impressão de Peças do Tipo 1 e de corte de visores.

A potência média consumida na máquina de corte foi de 0,8599 kW e na impressora foi de 0,1253 kW. O consumo total para a produção dos lotes considerados como referência foram de 0,1170 kWh para a máquina de corte e de 0,8103 kWh para a impressora. Os valores de consumo foram considerados tanto no módulo DES quanto no módulo LCA. Os resultados dos cálculos de consumo de energia (em kWh) são apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7.

Para as medições foram utilizados dois Registradores de Grandeza Elétricas, modelos MARH-21 993PT e MARH-21 991PT, da fabricante RMS. As aferições ocorreram nos dias 19 e 20 de dezembro de 2023: a máquina de corte foi monitorada em operação no dia 19, no turno da manhã, das 9:08 às 9:16 (8 min de operação); e a impressora selecionada como referência – Creality Ender 3 – foi monitorada em operação no dia 20, das 9:42 às 16:10 (388 min de operação). Esta impressora foi selecionada por ser a mais utilizada no processo aditivo (cinco impressoras disponíveis no AM-HUB – ver Tabela 5.1 na seção 5.1.1). Os tempos de

monitoramento simularam a operação da máquina de corte para um lote de 12 visores e da impressora para um lote de duas peças do Tipo 1.

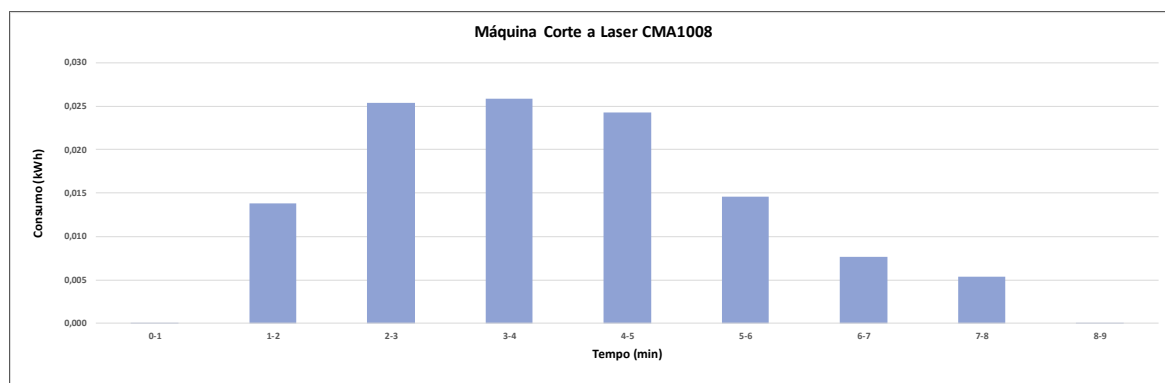


Figura 5.6 – Gráficos de consumo da máquina de corte em KWh

Fonte: Laboratório de Eficiência Energética da PUCRS (2024)

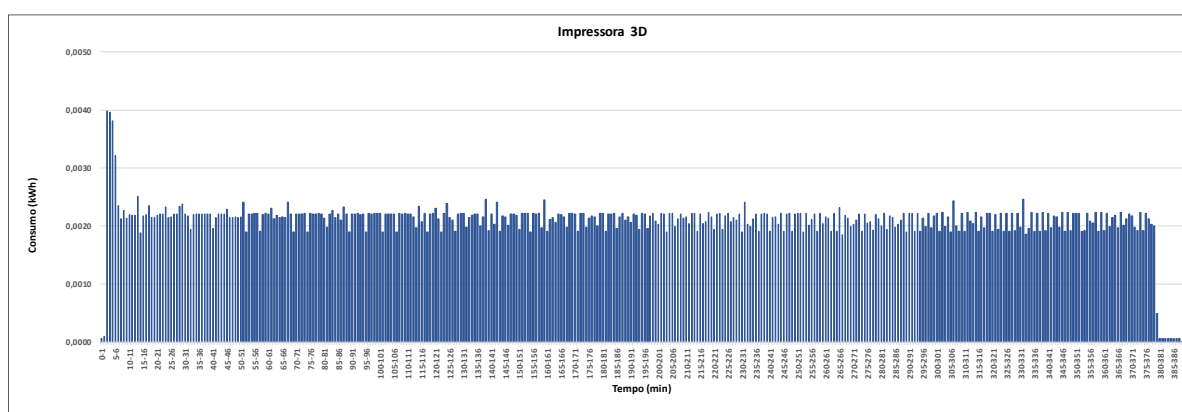


Figura 5.7 – Gráficos de consumo da impressora referência em KWh

Fonte: Laboratório de Eficiência Energética da PUCRS (2024)

5.2.1.3 Clusterização dos demandantes

O *software* SPSS versão 17.0 foi utilizado para apoiar a etapa de clusterização. Um computador com processador Intel Core TM i7-6700 CPU@3.40 GHz foi usado para apoiar esta etapa. O algoritmo selecionado no *software* foi o *K-means*, que minimiza a soma dos erros quadráticos entre o centro do *cluster* e cada objeto agrupado no *cluster* (JAIN, 2010). O algoritmo *K-means* é adequado para análises que demandam a definição de um número fixo de grupos (EVERITT *et al.*, 2011).

A aplicação do algoritmo *K-means* permite identificar os agrupamentos possíveis dentro do critério de similaridade utilizado. A localização dos solicitantes foi a medida de similaridade utilizada para o agrupamento dos casos pela proximidade

entre eles. Foram utilizados dados de localização de todos os 46 solicitantes, sendo que a localização foi definida em uma escala cartesiana, com cada ponto de localização representado por uma coordenada x e uma coordenada y. Para exemplificar, na Figura 5.8 estão indicadas algumas coordenadas – as coordenadas de todas as localizações são apresentadas no APÊNDICE H.

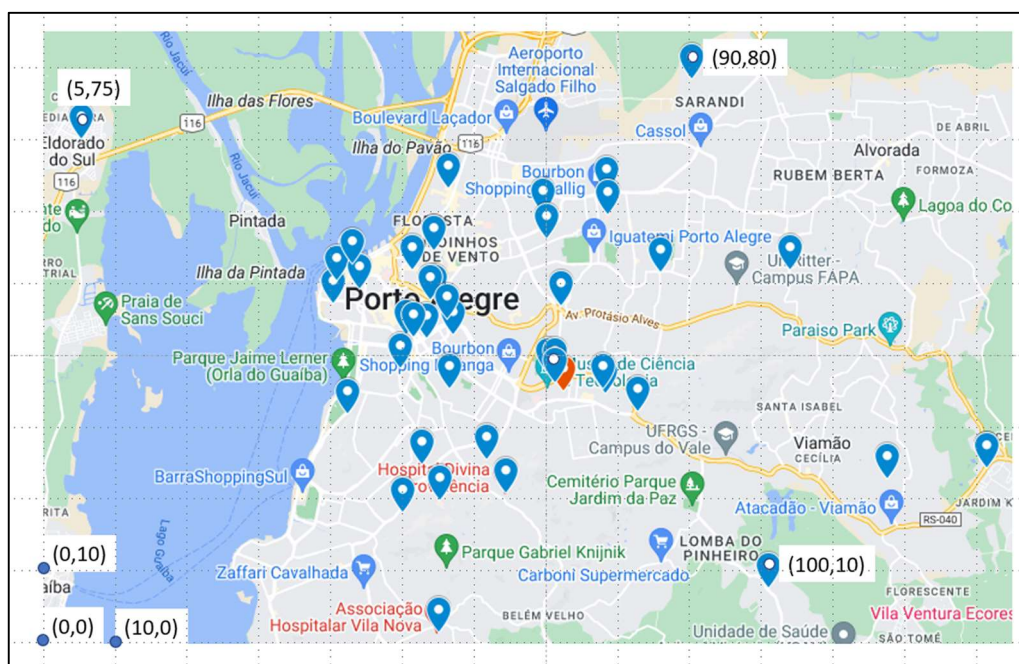


Figura 5.8 – Mapa com plano cartesiano para definição das coordenadas dos demandantes
Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Google *My Maps* e *Microsoft Power Point* (2024)

Na Figura 5.9 estão indicados todos os demandantes: 1 demandante em Santa Maria, 1 em São Leopoldo, 2 no litoral do Estado do RS e 42 demandantes distribuídos nos municípios de Porto Alegre, Eldorado do Sul e Viamão. Pela distribuição dos demandantes foi definido que o cenário de comparação deveria estar organizado em pelo menos 4 *clusters* (representados pelos círculos vermelhos na Figura 5.9). O valor inicial ($K = 4$) para aplicação do algoritmo foi definido pela lógica de proximidade entre solicitantes.

No estudo realizado foram definidos 6 cenários para execução do algoritmo: 4, 5, 6, 7, 8 e 9 *clusters*. Avaliando a localização dos demandantes dentro de Porto Alegre e Viamão, há agrupamentos potenciais que podem ser realizados pela proximidade. Os resultados da clusterização para $K=5$ são apresentados no APÊNDICE I para exemplificar as saídas do *software* de clusterização. No Quadro 5.4 são resumidos os agrupamentos para os diferentes números de *clusters*.

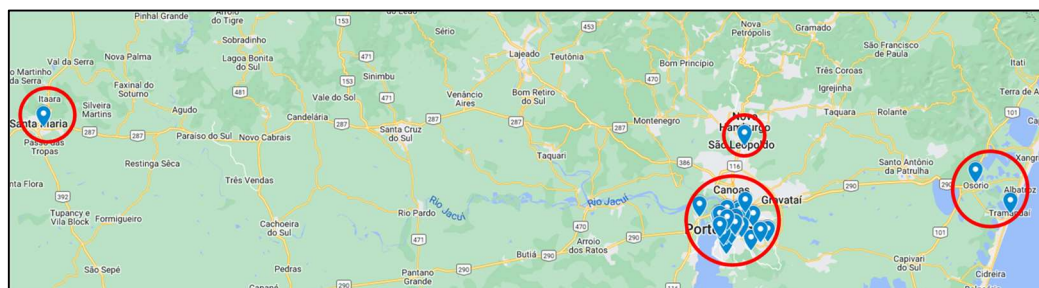


Figura 5.9 - Mapa com distribuição dos demandantes no Estado do RS

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Google My Maps (2024)

Quadro 5.4 - Agrupamentos para diferentes cenários de *clusters*

Quantidade de <i>Clusters</i>	Agrupamentos obtidos
K=4	Cluster 1 = Porto Alegre, Viamão e Eldorado do Sul
	Cluster 2 = Litoral
	Cluster 3 = Santa Maria
	Cluster 4 = São Leopoldo
K = 5	Cluster 1 = São Leopoldo
	Cluster 2 = Parte de Porto Alegre e Viamão
	Cluster 3 = Litoral
	Cluster 4 = Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
	Cluster 5 = Santa Maria
K = 6	Cluster 1 = São Leopoldo
	Cluster 2 = Parte de Porto Alegre e Viamão
	Cluster 3 = Osório
	Cluster 4 = Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
	Cluster 5 = Santa Maria
	Cluster 6 = Tramandaí
K = 7	Cluster 1 = São Leopoldo
	Cluster 2 = Tramandaí
	Cluster 3 = Santa Maria
	Cluster 4 = Osório
	Cluster 5 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 6 = Eldorado do Sul
	Cluster 7 = Parte de Porto Alegre e Viamão
K = 8	Cluster 1 = Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
	Cluster 2 = Osório
	Cluster 3 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 4 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 5 = São Leopoldo
	Cluster 6 = Tramandaí
	Cluster 7 = Santa Maria
	Cluster 8 = Viamão
K = 9	Cluster 1 = Viamão
	Cluster 2 = Eldorado do Sul
	Cluster 3 = Tramandaí
	Cluster 4 = Osório
	Cluster 5 = São Leopoldo
	Cluster 6 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 7 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 8 = Parte de Porto Alegre
	Cluster 9 = Santa Maria

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do *software* SPSS versão 17.0 (2024)

No agrupamento K=5 foram obtidos 2 *clusters* dentro da área de Porto Alegre, Eldorado do Sul e Viamão. No K=6, esses 2 *clusters* foram mantidos e o *cluster* Litoral foi dividido em dois (Tramandaí e Osório). Em K=7 o demandante de Eldorado do Sul foi separado do agrupamento com demandantes de Porto Alegre. No cenário de K=8 foram gerados 3 *clusters* com partes de Porto Alegre e Eldorado do Sul voltou a ficar agrupado em uma das partes. Além disso, foi gerado um agrupamento de demandantes de Viamão. Em K=9 o demandante de Eldorado do Sul voltou a ficar sozinho em um *cluster*.

O agrupamento considerado para comparação com o modelo do cenário AM-HUB foi o K = 5. O critério de escolha foi a disponibilidade de potenciais produtores/montadores (centros de produção) do produto analisado para cada *cluster*. Os critérios de seleção dos centros de produção foram: (i) os potenciais fornecedores do serviço de produção de *face shields* devem ter o mesmo perfil do IDEIA-PUCRS, ou seja, centros de pesquisa e ou serviços dentro de Universidades; e (ii) os centros de produção AM devem estar próximos aos centróides dos *clusters* definidos. A escolha por este perfil de fornecedor em situações de ruptura de fornecimento, como o acontecido na pandemia de COVID-19, visa o atendimento com foco no impacto social e não econômico-financeiro. Além disso, esses centros de produção em Universidades podem atender outras demandas e utilizar de forma mais eficiente a disponibilidade dos equipamentos. No Quadro 5.5 são discriminados os produtores AM para cada *cluster*, e no APÊNDICE J são discriminadas as distâncias entre os demandantes dos *cluster* (K=5) e seu centro de produção (AM-CLUSTER).

Quadro 5.5 - Agrupamentos e produtores para K=5

Quantidade de <i>Clusters</i>	Agrupamentos obtidos	Produtor de <i>face shield</i>
K = 5	Cluster 1 = São Leopoldo	UNITEC - UNISINOS
	Cluster 2 = Parte de Porto Alegre e Viamão	IDEIA - PUCRS
	Cluster 3 = Litoral	UFRGS - CAMPUS LITORAL NORTE
	Cluster 4 = Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	LIFEELAB - UFRGS - CAMPUS CENTRAL
	Cluster 5 = Santa Maria	LPST - UFSM

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do *software* SPSS versão 17.0

As distâncias entre o AM-CLUSTER e os demandantes permitiram estimar os tempos de deslocamento máximo e mínimo, com base em referências obtidas no *Google Maps* (APÊNDICE K). No APÊNDICE L são apresentadas as amostras de tempos de transporte na distribuição dos *face shields*, geradas com valores aleatórios

entre os valores limites de tempo e com o apoio do *software* SPSS versão 17.0. No APÊNDICE M são apresentadas as distribuições de probabilidade dos tempos de entrega dos *face shields* para cada *cluster*.

5.2.2 Modelagem Conceitual

O modelo conceitual foi estruturado para representar o comportamento do sistema e foi documentado com a notação IDEF-SIM (APÊNDICE N). Na modelagem da AM-HUB, os processos de produção e fornecimento foram definidos a partir das suas capacidades e das inter-relações com outros processos. Cada processo tem seus parâmetros específicos como, por exemplo, taxas de consumo de recursos, taxas de geração de resíduos, tempos de processamento, tamanhos de lote, tempo médio entre falhas e tempo médio de reparo de máquinas.

A validação do modelo AM-HUB no estudo de caso abordado foi realizada por uma equipe de especialistas do IDEIA-PUCRS, que avaliaram o modelo conceitual do AM-HUB e os dados e informações apresentadas nas seções 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 e 5.2.1. Foram avaliados os fluxos de materiais, componentes, insumos, produtos e informações, além dos tempos de operações e transportes, geração de resíduos e consumo de energia e de materiais.

5.2.3 Modelagem Computacional

A partir da coleta e tratamento dos dados, e da estruturação do modelo conceitual da AM-HUB, foi desenvolvido o modelo computacional. O *software* selecionado para a construção do modelo foi o ProModel *for Windows*, que utiliza o método DES. Um computador com processador Intel Core TM i7-6700 CPU@3.40 GHz foi usado para realizar as simulações.

A representação visual do modelo computacional desenvolvido é apresentada no APÊNDICE O. Para a construção do modelo no *software* foram utilizados os seguintes elementos que compõem o aplicativo:

- (a) Locais: fornecedores, estocagem de matérias-primas e componentes, operações de preparação, operações de produção e de acabamento, operações de montagem, armazenagem de produtos acabados e locais de entrega;

- (b) Entidades: ordens de produção, ordens de entrega, matérias-primas, peças, visor, fita elástica, produto acabado (*face shield*) e lote de entrega;
- (c) Recursos: veículos;
- (d) Redes de caminho: caminhos percorridos pelos veículos para entrega de produto acabado e caminhos das entregas de matérias-primas;
- (e) Chegadas: quantidade e frequência dos pedidos (ordens de produção e ordens de entrega) e das matérias-primas; e
- (f) Processos: lógicas para os fluxos de materiais, de produto e de informações.

A construção do modelo computacional atende às seguintes considerações: (i) o modelo deve representar os atendimentos das demandas discriminadas no APÊNDICE B e resumidas de forma agregada por mês, e sem discriminação do demandante, na Tabela 5.5; (ii) os locais de entrega dos produtos estão definidos (demandantes); (iii) os dados de tempo de operações, de transportes e entre chegadas de pedidos serão representados por distribuições de probabilidade, definidas e apresentadas na seção 5.2.1, com o objetivo de reduzir a complexidade da construção e programação do modelo; (iv) a rodada de simulação foi definida para representar o funcionamento do sistema analisado de março de 2020 a maio de 2021; e (vii) foi definido um número inicial de 10 replicações da rodada de simulação para validação do modelo.

Tabela 5.5 – Demandas e entregas mensais

Mês/ano	Demanda (unidades)	Demanda acumulada (unidades)	Entrega (unidades)	Entrega acumulada (unidades)
mar-20	635	635	50	50
abr-20	4.240	4.875	1.292	1.342
mai-20	851	5.726	1.548	2.890
jun-20	2.237	7.963	914	3.804
jul-20	135	8.098	1.589	5.393
ago-20	223	8.321	2.928	8.321
set-20	3.702	12.023	2.284	10.605
out-20	110	12.133	1.288	11.893
nov-20	2.250	14.383	800	12.693
dez-20	0	14.383	600	13.293
jan-21	0	14.383	800	14.093
fev-21	1.836	16.219	300	14.393
mar-21	0	16.219	0	14.393
abr-21	0	16.219	1.016	15.409
mai-21	0	16.219	810	16.219

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

A partir da modelagem computacional, e execução de uma rodada de simulação, foi realizada a verificação qualitativa dos fluxos no *hub*. Na verificação foram considerados os elementos do modelo, a sequência de eventos que deveriam ocorrer na execução da simulação, segundo o modelo conceitual, e os fluxos de materiais entre os fornecedores do *hub*, dentro do *hub* e da entrega do produto no demandante. Rodando o modelo dentro do período definido (rodada de simulação), verificou-se que os fluxos reais foram representados na simulação e não foram indicados erros de programação fornecidos pelo *software*. Também foram analisadas relações *input-output*, para verificação de consistência a partir da variação de dados de entrada e do efeito nos dados de saída (Quadro 5.6). Desta forma, foi garantida uma verificação satisfatória do modelo programado.

Quadro 5.6 – Verificação de *inputs-outputs* do modelo computacional

<i>INPUT</i>	<i>OUTPUT</i>	VERIFICAÇÃO
Redução do tempo de ciclo de impressão	Aumento da quantidade de peças impressas por unidade de tempo	OK
Redução do tempo de ciclo de corte	Aumento da quantidade de visores produzidos por unidade de tempo	OK
Redução do tempo de ciclo de montagem	Aumento da quantidade de <i>face shields</i> montados por unidade de tempo	OK
Aumento da quantidade de peças impressas	Aumento do consumo de energia	OK
Aumento da quantidade de peças impressas	Aumento do consumo de PLA	OK
Aumento da quantidade de peças impressas	Aumento da quantidade de resíduos de PLA	OK
Aumento da quantidade de visores produzidos	Aumento do consumo de energia	OK
Aumento da quantidade de visores produzidos	Aumento do consumo de PETG	OK
Aumento da quantidade de visores produzidos	Aumento da quantidade de resíduos de PETG	OK
Aumento da taxa de não conformes - peças	Aumento de peças impressas descartadas	OK
Aumento da quantidade de <i>face shields</i> montados	Aumento da quantidade <i>face shields</i> entregues	OK

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Com o modelo verificado, foram aplicados os procedimentos de validação do modelo. Na validação do modelo foram selecionadas 16 variáveis operacionais para análise:

- Tempo de entrega de PLA;
- Tempo de entrega de PETG;
- Tempo de Entrega de Fita Elástica;
- Tempo da impressora tipo 1 (produz peças do Tipo 1) em *stand-by*;
- Tempo de ciclo da impressora tipo 1;
- Tempo da impressora tipo 2 (produz peças do Tipo 2) em *stand-by*;

- Tempo de ciclo da impressora tipo 2;
- Tempo de ciclo da Corte Laser;
- Tempo de ciclo de Montagem;
- Quantidade de *face shields* montadas;
- Quantidade de *face shields* entregues no Campus Central;
- Quantidade de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km;
- Quantidade de *face shields* entregues em demandantes localizados acima de 30 km;
- Tempo de entrega de *face shields* entregues no Campus Central;
- Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km; e
- Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados acima de 30 km.

O consumo de energia não foi considerado como variável para validação da simulação pois: (i) foi utilizado no estudo um valor medido em operações que simularam as produções na máquina de corte e em uma impressora padrão de consumo e (ii) a variável consumo de energia é dependente da quantidade produzida, que foi utilizada como variável de validação do modelo computacional.

Com as variáveis definidas, foi realizada a simulação do número inicial de 10 replicações para a rodada de simulação. O uso de replicações de simulação se deve ao fato dos dados gerados, a partir de distribuições estatísticas, representarem a variabilidade do comportamento do sistema, pois os tempos de transporte, de preparação, de produção e de montagem variam conforme a distribuição de probabilidade definida.

A realização de replicações de simulação permite o cálculo, com a Equação (4.1), da precisão da informação média gerada a partir da amostra de resultados. Se a precisão não atender as expectativas dos envolvidos, aplica-se a Equação (4.2) para definir o tamanho de amostra de replicações que gera a precisão desejada pelos tomadores de decisão. No APÊNDICE P são apresentados os resultados das precisões – Equação (4.1) – geradas com 10 replicações para cada uma das variáveis de validação. Neste estudo foi considerado que um valor de precisão de até 10% atende a simulação do comportamento do sistema de forma acurada, ou seja, um erro

do valor médio gerado na simulação deve ser diferente em no máximo 10% do valor real da variável analisada.

A partir dos resultados gerados foram identificadas 12 variáveis, de um total de 16 (75% das variáveis), com precisões que atenderam o critério de valor menor ou igual à 10%. Desta forma o cálculo de replicações – Equação (4.2) – foi aplicado nas variáveis com erro maior do que 10%. Para a variável ‘tempo de entrega de *face shield* para demandantes até 30 km do AM-HUB’ foram definidas 20 replicações, para a variável ‘tempo de entrega de *face shield* para demandantes no Campus Central’ foram definidas 22 replicações, para a variável ‘tempo de entrega de *face shield* para demandantes acima de 30 km do AM-HUB’ foram definidas 40 replicações e para a variável ‘quantidade de *face shield* entregues para demandantes até 30 km do AM-HUB’ foram definidas 249 replicações. Para melhorar a precisão dos resultados foi definido o número de 40 replicações para todas as variáveis e os resultados das 40 replicações são apresentados no APÊNDICE P.

A partir dos resultados de precisão, 15 variáveis atendem o critério de erro com valor menor ou igual à 10%, e uma variável ficou fora do critério com 12,76% de erro, valor próximo do critério de 10%. Desta forma, foi considerado que o número de 40 replicações geraria dados que representam o comportamento real do sistema simulado e foi realizada a validação do modelo com os resultados das 40 replicações.

Para exemplificar o efeito da variabilidade do sistema real nos *outputs* das replicações, são apresentados gráficos no APÊNDICE Q, que representam, respectivamente, os resultados de cada replicação da simulação do funcionamento do AM-HUB para as variáveis ‘Tempo de ciclo da impressora tipo 1’ e ‘Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km’. O período de simulação foi de março de 2020 a maio de 2021.

O processo de validação baseou-se na comparação dos resultados da simulação com o desempenho real do sistema. Os *outputs* do modelo computacional são gerados com as 40 replicações de simulação. A partir dos *outputs* das replicações do modelo computacional é utilizada a Equação (4.3) – seção 4.2.3 – para verificar a média da diferença entre os resultados da simulação e os resultados reais. O modelo é validado quando o intervalo calculado (IC) possui o 0 (zero) entre o limite superior e inferior do intervalo de confiança. No caso de os limites inferior e superior do intervalo resultarem em dois números positivos ou em dois negativos, o modelo não pode ser considerado válido (CHWIF e MEDINA, 2010).

Os resultados das validações das variáveis são apresentados no APÊNDICE R e resumidas na Tabela 5.6. O intervalo contém zero no cálculo para todas as variáveis, o que indica que os resultados da simulação não podem ser considerados diferentes dos resultados do sistema real. A partir dos resultados das validações foi considerado que o modelo computacional representa o sistema real. A programação computacional desenvolvida está discriminada no APÊNDICE S.

Tabela 5.6 – Intervalo da média da diferença entre os resultados da simulação e os resultados reais para as variáveis consideradas na validação do modelo computacional

Variável	Valor da variável no sistema real	Valor médio gerado na simulação	Limite inferior do Intervalo	Limite superior do Intervalo
TEMPO DE ENTREGA PLA	48,5 min	47,61 min	-0,02	1,79
TEMPO DE ENTREGA PETG	18,5 min	18 min	-0,02	1,02
TEMPO DE ENTREGA FITA ELÁSTICA	33 min	32,87	-0,82	1,08
TEMPO IMPRESSORA TIPO 1 EM STAND-BY	7,45 min	7,93 min	-1,09	0,14
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 1 IMPRESSORA TIPO 1	320 min	321,89 min	-3,80	0,02
TEMPO IMPRESSORA TIPO 2 EM STAND-BY	35 min	34,67 min	-0,77	1,44
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 2 IMPRESSORA TIPO 2	350 min	348,2 min	-1,83	5,44
TEMPO DE CICLO CORTE LASER	10 min	10,22 min	-0,58	0,14
TEMPO DE CICLO MONTAGEM	0,75 min	0,76 min	-0,01	0,00
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS MONTADAS	16.219 unidades	16.221,53 unidades	-6,64	1,59
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIEL Campus Central	5 min	4,82 min	-0,08	0,43
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES Campus Central	7.457 unidades	7558,85 unidades	-241,05	37,35
TEMPO DE ENTREGA DO FACE SHIELD até 30 km	27,21 min	27,13 min	-1,27	1,42
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES até 30 km	8.637 unidades	8.574,70 unidades	-78,33	202,93
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIELD acima de 30 km	195,1 min	178,41 min	-1,39	34,77
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES acima de 30 km	125 unidades	116,21 unidades	-7,17	24,74

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Com base no modelo computacional validado são realizados experimentos no modelo, considerando que os resultados dos experimentos podem ser utilizados para fazer inferências sobre o sistema real e para apoiar tomadas de decisão. No caso do presente estudo foi definido um experimento de mudança de localização das tecnologias de AM, discriminado na próxima seção.

5.2.4 Simulação dos Experimentos

Esta seção aborda os resultados obtidos nas rodadas de simulação do experimento testado. O experimento foi baseado em mudanças planejadas nos processos de produção e de logística de entrega dos *face shields*. Para auxiliar na estruturação do experimento foram utilizadas informações geradas por relatórios de saída da simulação da configuração AM-HUB.

A configuração centralizada em um *hub* de AM beneficia a utilização dos equipamentos, pois há maior ocupação das máquinas com pedidos de produção. A logística de distribuição no AM-HUB é impactada negativamente, pois nesta configuração os demandantes estão localizados mais longe do centro produtivo fornecedor de *face shields*. Isso indica uma oportunidade para a avaliação da

redistribuição de capacidade de impressão para locais próximos das demandas. A configuração AM-CLUSTER simula a distribuição das operações de impressão de peça e de montagem dos produtos em centros de serviços que atendem um agrupamento de demandantes mais próximos do produtor.

A configuração experimental AM-CLUSTER foi estruturada de forma a considerar as seguintes delimitações:

- (1) O fornecedor de *face shields* de um *cluster* foi denominado de centro de serviço do *cluster*;
- (2) Os centros de serviços foram definidos a partir das coordenadas do centroide de cada *cluster*, sendo selecionado um local com potencial para atendimento dos serviços de produção e montagem (APÊNDICE J). Com o local selecionado, foram levantadas as distâncias entre o centro de serviço e os demandantes do *cluster*;
- (3) As impressões de peças, a produção de visores e o processo de montagem dos *face shields* são realizados no centro de serviço do *cluster*;
- (4) O número de impressoras em cada centro de serviço foi definido pelo histórico de consumo dos demandantes do *cluster*, disponível no APÊNDICE B;
- (5) Não será avaliada a relação do desempenho ambiental com a utilização e ociosidade das impressoras;
- (6) Cada centro de serviço tem uma máquina de corte a laser e as operações de corte de fita e acabamento da Peça Tipo 1 como no AM-HUB; e
- (7) Os fornecedores de PLA, PETG e Fita elástica, para cada *cluster*, estarão a uma distância igual à da configuração AM-HUB e serão consideradas as mesmas distribuições de probabilidade para representar os tempos de entrega.

A configuração AM-CLUSTER foi organizada para simulação conforme discriminado na Tabela 5.7. As quantidades de impressoras, demandantes e demanda (período e quantidade) são detalhadas na tabela citada.

Tabela 5.7 – Equipamentos, demanda total de *face shields* e demandantes por *cluster*

Configurações	Período de Simulação	Quantidade de impressoras	Demandantes	Demanda
AM-HUB	março de 2020 - maio de 2021	14	46	16.219
Cluster 1 = São Leopoldo	agosto de 2020	2	1	60
Cluster 2 = Parte de Porto Alegre e Viamão	março de 2020 - maio de 2021	6	17	14.494
Cluster 3 = Litoral	abril de 2020 - maio de 2020	2	2	45
Cluster 4 = Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	março de 2020 - fevereiro de 2021	2	25	1.590
Cluster 5 = Santa Maria	junho de 2020	2	1	30

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Os tempos de preparação, produção e montagem no AM-HUB, bem como a taxa de consumo de materiais por unidade produzida foram mantidas no experimento. A quantidade produzida em cada centro de serviço AM foi definida pela demanda dos solicitantes dentro do agrupamento definido, sendo considerado o período entre março de 2020 e maio de 2021 para a análise dos parâmetros de desempenho em relação ao atendimento da demanda de *face shields*.

O *cluster 1* (São Leopoldo) teve uma demanda de 60 unidades em agosto de 2020 e a entrega foi no mesmo mês. As demandas e entregas para o *cluster 2* (parte de Porto Alegre e Viamão) e para o *cluster 4* (parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul) são apresentadas nas Tabelas 5.8 e 5.9.

Tabela 5.8 – Demandas e entregas mensais do *cluster 2*

Mês/ano	Demanda (unidades)	Demanda acumulada (unidades)	Entrega (unidades)	Entrega acumulada (unidades)
mar-20	575	575	50	50
abr-20	3.726	4.301	718	768
mai-20	546	4.847	1.313	2.081
jun-20	2.097	6.944	704	2.785
jul-20	15	6.959	1.469	4.254
ago-20	63	7.022	2.768	7.022
set-20	3.552	10.574	2.134	9.156
out-20	110	10.684	1.288	10.444
nov-20	2.000	12.684	550	10.994
dez-20	0	12.684	600	11.594
jan-21	0	12.684	800	12.394
fev-21	1.810	14.494	274	12.668
mar-21	0	14.494	0	12.668
abr-21	0	14.494	1.016	13.684
mai-21	0	14.494	810	14.494

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 5.9 – Demandas e entregas mensais do *cluster 4*

Mês/ano	Demanda (unidades)	Demanda acumulada (unidades)	Entrega (unidades)	Entrega acumulada (unidades)
mar-20	60	60	0	0
abr-20	504	564	564	564
mai-20	270	834	200	764
jun-20	110	944	180	944
jul-20	120	1.064	120	1.064
ago-20	100	1.164	100	1.164
set-20	150	1.314	150	1.314
out-20	0	1.314	0	1.314
nov-20	250	1.564	250	1.564
dez-20	0	1.564	0	1.564
jan-21	0	1.564	0	1.564
fev-21	26	1.590	26	1.590
mar-21	0	1.590	0	1.590
abr-21	0	1.590	0	1.590
mai-21	0	1.590	0	1.590

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

O *cluster* 3 (Litoral) gerou pedidos em abril (10 unidades) e em maio (35 unidades), com entregas dentro do mês do pedido. O *cluster* 5 (Santa Maria) demandou 30 unidades em junho de 2020, com entrega no mesmo mês.

As distâncias dos fornecedores de matérias-primas da configuração AM-HUB foram mantidas na nova configuração AM-CLUSTER, sendo que o impacto total (considerando todas as entregas) neste caso é o mesmo para as duas configurações. Em relação ao tempo de distribuição dos *face shields* os impactos ambiental e operacional variam, pois a produção AM está mais próxima dos demandantes.

Com a distribuição das impressoras para os 5 *clusters* há um impacto na utilização do recurso impressora nas novas configurações: nos *clusters* 1, 3 e 5 as impressoras foram utilizadas durante poucos períodos e as demandas foram baixas; nos *clusters* 2 e 4 os equipamentos tiveram maior ocupação devido à demanda. Na Tabela 5.10 são apresentados os percentuais de utilização e de ociosidades dos recursos em cada *cluster* e no AM-HUB.

Tabela 5.10 – Utilização das impressoras nas diferentes configurações

CENÁRIO	Nome	% Operação	% Ocioso	% Aguardando	% Bloqueado	% Parada Não-Planejada
AM-HUB	IMPRESSORA 3D TIPO 1	38,58	51,37	0	8,93	1,12
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	38,46	51,46	0	8,97	1,11
	CORTE LASER	17,78	78,25	0	3,97	0
	CORTE DA FITA	0,65	99,35	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	3,07	15,34	81,59	0	0
AM-CLUSTER 1	IMPRESSORA 3D TIPO 1	42,37	51	0	5,39	1,23
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	7,45	91,23	0	0	1,31
	CORTE LASER	1,87	98,13	0	0	0
	CORTE DA FITA	0,18	99,82	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	0,25	32,82	66,93	0	0
AM-CLUSTER 2	IMPRESSORA 3D TIPO 1	73,97	7,18	0	17,82	1,03
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	63,5	19,9	0	15,56	1,04
	CORTE LASER	16,07	80,34	0	3,58	0
	CORTE DA FITA	0,59	99,41	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	3,28	20,63	76,09	0	0
AM-CLUSTER 3	IMPRESSORA 3D TIPO 1	14,66	81,33	0	2,82	1,19
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	2,57	96,21	0	0	1,22
	CORTE LASER	0,61	99,3	0	0	0
	CORTE DA FITA	0,06	99,94	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	0,09	23,55	76,35	0	0
AM-CLUSTER 4	IMPRESSORA 3D TIPO 1	55,4	30,32	0	13,18	1,08
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	10,41	85,59	0	2,81	1,19
	CORTE LASER	2,28	97,72	0	0	0
	CORTE DA FITA	0,1	99,9	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	0,27	4,78	94,95	0	0
AM-CLUSTER 5	IMPRESSORA 3D TIPO 1	23,47	69,98	0	5,35	1,2
	IMPRESSORA 3D TIPO 2	4,19	94,52	0	0	1,29
	CORTE LASER	1,2	98,8	0	0	0
	CORTE DA FITA	0,11	99,89	0	0	0
	MONTAGEM FINAL	0,2	52,01	47,78	0	0

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Verifica-se que a etapa de impressão das peças do Tipo 1 é o gargalo do processo analisado, principalmente quando a configuração dos *clusters* é utilizada. Com a configuração AM-CLUSTER obteve-se uma redução de utilização dos recursos e uma capacidade produtiva ociosa nos centros de serviços dos *clusters*, mas como os fornecedores do serviço de AM foram organizados em Universidades, a disponibilidade dos equipamentos pode provavelmente ser utilizada para atendimento de outras demandas, tanto internas quanto externas. No caso das demandas extras da Universidade forem baixas, a capacidade ociosa poderia ser tratada como uma estratégia de robustez em casos de ruptura de fornecimento de peças que podem ser produzidas com AM.

Foram realizadas 20 replicações para a rodada de simulação do experimento. Os resultados do experimento e da simulação do AM-HUB, em termos de tempos de entrega dos protetores, são apresentados na Tabela 5.11. Os dados gerados pela simulação dos modelos computacionais AM-HUB e AM-CLUSTER foram utilizados para integração com os resultados da LCA. A forma como foram utilizados na integração e na geração de resultados para a avaliação do desempenho ambiental está discriminada no capítulo 5.4.

Tabela 5.11 – Resultados de tempo de entrega de *face shield* dos cenários AM-HUB e AM-CLUSTER

	AM-HUB			AM-CLUSTER 1	AM-CLUSTER 2		AM-CLUSTER 3	AM-CLUSTER 4	AM-CLUSTER 5
	Campus Central	Até 30 km	Acima de 30 km		Campus Central	Fora do Campus Central			
	4,94	26,03	140,06	6,47	4,64	11,28	9,45	8,07	9,11
	4,55	27,05	186,13	7,81	4,81	9,30	9,59	6,73	9,58
	4,66	26,63	147,91	8,09	4,19	9,80	9,83	6,48	9,63
	5,40	26,55	229,86	6,25	4,90	7,55	9,38	9,19	9,46
	5,61	24,92	113,03	8,25	4,85	8,45	9,66	6,09	8,90
	4,20	26,88	157,26	7,78	4,74	9,47	10,40	11,94	9,60
	3,98	27,32	148,28	7,67	5,02	10,07	9,82	9,73	9,16
	5,05	25,44	244,98	6,22	5,08	8,38	9,96	8,43	9,57
	4,87	24,25	243,45	8,84	4,24	8,47	10,04	12,21	9,32
Tempo de entrega (min)	4,00	30,57	182,82	6,71	5,31	9,02	9,53	8,51	9,41
	5,03	25,54	175,05	7,54	4,31	9,23	9,78	7,94	8,91
	4,33	35,36	221,00	8,06	5,09	9,57	9,68	7,12	9,89
	5,28	33,48	151,78	7,57	5,10	7,95	10,65	7,80	9,52
	5,34	23,99	202,85	6,79	4,72	10,07	9,33	10,81	9,49
	4,74	27,95	146,31	5,78	5,25	9,91	9,65	7,43	9,47
	4,59	31,09	172,98	8,01	4,65	9,41	9,75	10,31	9,47
	4,25	26,75	150,64	7,47	4,74	7,69	9,73	9,10	9,54
	4,29	28,88	115,46	8,14	4,34	7,74	9,56	7,42	9,58
	4,43	32,14	185,10	6,04	4,87	8,72	9,34	8,63	9,23
	4,42	23,68	198,35	7,11	4,58	8,89	9,80	9,92	10,10
Média (min)	4,70	27,73	175,66	7,33	4,77	9,05	9,75	8,69	9,45
Máximo (min)	5,61	35,36	244,98	8,84	5,31	11,28	10,65	12,21	10,10
Mínimo (min)	3,98	23,68	113,03	5,78	4,19	7,55	9,33	6,09	8,90
Desvio-padrão (min)	0,48	3,24	38,82	0,86	0,33	0,96	0,33	1,72	0,29

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

5.3 Avaliação do desempenho ambiental

Esta etapa foi executada com apoio de um *software* especializado em LCA e de um computador com processador Intel Xeon W-2235 CPU@3.80 GHz. O *software* de LCA selecionado foi o SimaPro versão 9.5, amplamente utilizado e que segue as normas ISO 14040 e 14044. O *software* permite a gestão e armazenamento de inventários de ciclos de vidas e a caracterização dos impactos ambientais. O SimaPro disponibiliza uma base de dados com métodos de Impacto de Ciclo de Vida (LCIA) e bibliotecas com dados de inventários do ciclo de vida (LCI). Nas seções 5.3.1 e 5.3.2 são apresentados os resultados para as etapas de inventário e de avaliação do impacto ambiental, respectivamente.

5.3.1 Análise de Inventário

As definições apresentadas na seção 5.1 orientaram a etapa de inventário. A realização da LCI envolve a coleta de dados relacionados aos diferentes processos operacionais e logísticos. Inicialmente foi trabalhado o conjunto de dados coletados e estimados com apoio das equipes do IDEIA-PUCRS e do LABEE-PUCRS.

Nas seções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 foram discriminadas informações sobre a produção de cada componente e apresentados os dados sobre a taxa de chegada de pedidos, a quantidade de itens produzidos para cada tipo de peça, a quantidade de produtos acabados fabricados, a quantidade de material consumido, a geração de resíduos, os tempos do processo de fabricação, os tempos de corte, os tempos de montagem, as distâncias e as cargas de transportes.

A qualidade dos dados de inventário é avaliada pela sua precisão e representatividade (geográfica, temporal e tecnológica). Para cobrir esses requisitos, foram utilizados dados primários e dados secundários selecionados para representar o sistema real analisado. Os dados primários atendem os critérios de precisão e representatividade. Os dados secundários são baseados em estimativas qualificadas de modelos para regiões e tecnologias específicas, e disponíveis na literatura ou em banco de dados de inventário.

Os dados primários para a LCI, no estudo da AM-HUB, estão restritos: (i) aos tempos dos processos de AM, de corte de visores e de montagem dos *face shields*; (ii) aos dados sobre consumo de materiais, consumo de energia e geração de

resíduos; e (iii) ao número de transportes do produto realizados até o demandante. Isso orientou a complementação do levantamento de dados com medições diretas de consumo de energia nas operações de AM e de corte.

As informações faltantes na coleta de dados primários foram complementadas por inventários disponíveis no *software* de LCA e por referências disponibilizadas na literatura. A base de dados de inventário utilizada foi a Ecoinvent 3.9.1, baseada em valores médios (em unidades físicas) de entradas e saídas (cargas ambientais), e reconhecida pela quantidade, qualidade, credibilidade e abrangência geográfica dos dados disponibilizados. A base de dados Ecoinvent 3.9.1 contém aproximadamente 12.500 processos organizados em diferentes temas como, por exemplo, transporte, energia e produção de materiais (BJØRN et al., 2018b).

No *software* foram selecionadas as bibliotecas ‘Ecoinvent 3 – *allocation, cut-off by classification – system*’ e ‘Ecoinvent 3 – *allocation, cut-off by classification – unit*’. A escolha de inventários com abordagem *cut-off* gera análises que consideram que os resíduos são da responsabilidade do produtor. Essa definição não impacta no presente estudo, pois não faz parte do escopo a reciclagem de resíduos e a recuperação de energia, mas essa escolha pode ser utilizada em estudos futuros que ampliem o escopo do estudo para etapas de utilização do produto e de final de vida.

O uso de dados secundários é orientado por suposições transparentes e que permitam uma análise crítica das limitações dos resultados da LCA e a definição de melhorias na modelagem para implementação em estudos futuros sobre o mesmo sistema. As principais suposições definidas na etapa de LCI deste estudo foram:

1. A localização dos fornecedores das matérias-primas é uma localização de referência para a avaliação do impacto do transporte dos itens até o AM-HUB;
2. O transporte dos fornecedores até o AM-HUB foi realizado com veículos de carga de pequeno porte e o transporte do AM-HUB até os demandantes foi realizado com veículos leves (automóveis);
3. As distâncias e tempos de entregas considerados nos modelos AM-HUB e AM-CLUSTER são aqueles discriminados na seção 5.2.1;
4. Os transportes e os consumos de materiais secundários utilizados nas operações de impressão e corte como, por exemplo, cabeçote de impressão, pano para limpeza e adesivo para a mesa de impressão, não são relevantes para o estudo;
5. Os impactos da produção e manutenção de maquinários e equipamentos utilizados nas operações principais e de apoio no AM-HUB não serão considerados;

6. Os impactos de produção das matérias-primas, bem como da utilização e final da vida do produto, não afetam os objetivos deste estudo; e
7. Inventários de transporte, de consumo de energia e de emissões de componentes orgânicos voláteis substituem dados primários de forma satisfatória.

Nos Quadros 5.7 e 5.8 são discriminados os dados, informações e inventários de entrada e saída, respectivamente, utilizados na modelagem do AM-HUB, sendo considerada a unidade funcional para atender o fluxo de referência (montagem de 26 *face shields*). Os dados coletados foram documentados com base nas informações discriminadas nas folhas de coleta de dados indicadas na ISO 14044 (2006) e em Bjørn et al. (2018b).

Na escolha dos inventários deve-se levar em consideração se a aplicabilidade adequada dos resultados da LCA e a reprodutibilidade da avaliação representarão o contexto geográfico, temporal e tecnológico do sistema analisado. A utilização de inventários que não permitem a exata cobertura temporal, geográfica e tecnológica, demanda uma interpretação cuidadosa dos resultados gerados na LCA.

No presente estudo não foi possível selecionar todos os dados secundários com representatividade geográfica, temporal e/ou tecnológica, mas em função do objetivo principal do estudo ser verificar a contribuição da variabilidade na avaliação do desempenho ambiental, erros nos resultados das categorias de impacto ambiental não impactam na análise. Destaca-se que, apesar do uso de dados secundários não impactar na avaliação do método proposto, há limitações no uso dos resultados das categorias de impacto para uma avaliação efetiva de desempenho ambiental das configurações AM-HUB e AM-CLUSTER.

Em relação aos inventários selecionados e discriminados nos Quadros 8 e 9, são discriminadas a seguir as justificativas das escolhas. Para os resíduos de PLA e de PETG foi considerado o inventário '*Waste plastic, mixture {BR}| market for waste plastic, mixture | Cut-off, U*', que utiliza dados de mercado de resíduos plásticos no Brasil. O *mix* é composto pelas seguintes tecnologias: 3% de queima a céu aberto, 8% de lixão a céu aberto, 88% de aterro insalubre e 1% de incineração municipal. A decisão foi subjetiva, pois os resíduos no AM-HUB foram descartados para coleta seletiva, mas não havia informação sobre o destino e a reciclagem deles. Entende-se que a incerteza gerada com esta decisão não afetou o objetivo do estudo.

Quadro 5.7 – Inventário de dados de entrada

Entradas	Quantidade	Unidade	Observações sobre fontes e acessos	Etapa(s) do Processo	Cobertura temporal	Cobertura geográfica	Cobertura tecnológica
MATERIAIS							
Folha de PETG estocada	1,24	kg	Cálculo da massa do lote a partir da quantidade e peso específico do material, discriminado na seção 5.1.2	Corte da folha PETG/Produção de visores	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Filamento de PLA estocado	1,2815	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Impressão de peças do Tipo 1	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Filamento de PLA estocado	0,2377	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Impressão de peças do Tipo 2	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Fita cortada	0,027	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Montagem de <i>face shields</i>	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Lote de 26 visores	1,170	kg	Cálculo da massa do lote a partir da quantidade e peso específico do material, discriminado na seção 5.1.2	Montagem de <i>face shields</i>	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Laser CNC 130 W Modelo CMA 1008
Lote de 2 peças Tipo 1	1,217	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Montagem de <i>face shields</i>	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Impressora Creality Ender 3
Lote de 13 peças Tipo 2	0,235	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Montagem de <i>face shields</i>	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Impressora Creality Ender 3
Lote de 26 <i>face shields</i>	1	lote	Detalhes sobre a definição na seção 5.1.4	Entrega de <i>face shields</i> no Campus Central	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Lote de 26 <i>face shields</i>	1	lote	Detalhes sobre a definição na seção 5.1.4	Entrega de <i>face shields</i> até 30 km	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4
Lote de 26 <i>face shields</i>	1	lote	Detalhes sobre a definição na seção 5.1.4	Entrega de <i>face shields</i> acima de 30 km	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4
ENERGIA							
Electricity, low voltage [BR] market group for electricity, low voltage Cut-off, U	0,2341	KWh	Cálculo de consumo realizado a partir de medições em campo, discriminado na seção 5.2.1.2 / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Corte da folha PETG/Produção de visores	Consumo de energia: dados coletados no dia 19 de dezembro de 2023 Ecoinvent 3: 2015-2022	Dados de transporte: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Dados de consumo: Laser CNC 130 W Modelo CMA 1008 e Registradores de Grandeza Elétricas, modelos MARH-21 993PT e MARH-21 991PT, da fabricante RMS Ecoinvent: não especificada
Electricity, low voltage [BR] market group for electricity, low voltage Cut-off, U	10,5339	KWh	Cálculo de consumo realizado a partir de medições em campo, discriminado na seção 5.2.1.2 / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Impressão de peças do Tipo 1	Consumo de energia: dados coletados no dia 19 de dezembro de 2023 Ecoinvent 3: 2015-2022	Dados de transporte: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Dados de consumo: Impressora Creality Ender 3 e Registradores de Grandeza Elétricas, modelos MARH-21 993PT e MARH-21 991PT, da fabricante RMS Ecoinvent: não especificada
Electricity, low voltage [BR] market group for electricity, low voltage Cut-off, U	1,7726	KWh	Cálculo de consumo realizado a partir de medições em campo, discriminado na seção 5.2.1.2 / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Impressão de peças do Tipo 2	Consumo de energia: dados coletados no dia 19 de dezembro de 2023 Ecoinvent 3: 2015-2022	Dados de transporte: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Dados de consumo: Impressora Creality Ender 3 e Registradores de Grandeza Elétricas, modelos MARH-21 993PT e MARH-21 991PT, da fabricante RMS Ecoinvent: não especificada
TRANSPORTE							
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated [BR] transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated Cut-off, S	10,664	kgkm	Cálculo baseado no peso da carga de PETG para atender o fluxo de referência e a distância referência entre o fornecedor de PETG e o AM-HUB (seção 5.1.1) / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Armazenagem de folhas de PETG	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: caminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated [BR] transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated Cut-off, S	0,653	kgkm	Cálculo baseado no peso da carga de fita para atender o fluxo de referência e a distância referência entre o fornecedor de Fita e o AM-HUB (seção 5.1.1) / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Armazenagem de rolo de Fita	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: caminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated [BR] transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated Cut-off, S	65,274	kgkm	Cálculo baseado no peso da carga de filamento de PLA para atender o fluxo de referência e a distância referência entre o fornecedor de PLA e o AM-HUB (seção 5.1.1) / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Armazenagem de filamento de PLA	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: caminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 (GLO) market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cut-off, U	7,3	km	Cálculo baseado na média de distâncias entre o AM-HUB e os demandantes (seção 5.1.3) / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Entrega de <i>face shields</i> até 30 km	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2012-2022	Dados de distância e entregas: Porto Alegre e Grande Porto Alegre - Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Global	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4
Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 (GLO) market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cut-off, U	140,6	km	Cálculo baseado na média de distâncias entre o AM-HUB e os demandantes (seção 5.1.3) / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Entrega de <i>face shields</i> acima de 30 km	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2012-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Global	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Quadro 5.8 – Inventário de dados de saída

Saídas	Quantidade	Unidade	Observações sobre fontes e acessos	Etapa(s) do Processo	Cobertura temporal	Cobertura geográfica	Cobertura tecnológica
FLUXO DE REFERÊNCIA							
Lote de 26 <i>face shields</i>	1	lote	Detalhes sobre a definição nas seções 5.1.3 e 5.1.4	Entrega de <i>face shields</i> no Campus Central	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Dados de distância e entregas: Porto Alegre - Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
				Entrega de <i>face shields</i> até 30 km	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2012-2022	Dados de distância e entregas: Porto Alegre e Grande Porto Alegre - Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Global	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4
				Entrega de <i>face shields</i> acima de 30 km	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2012-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Global	Ecoinvent: veículo de passeio que funciona com gasolina, com padrão de emissão EURO4
OUTRAS SAIDAS							
Lote de 26 <i>face shields</i>	1	lote	Detalhes sobre a definição na seção 5.1.4	Montagem de <i>face shields</i>	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	-
Lote de 26 visores	1,170	kg	Cálculo da massa do lote a partir da quantidade e peso específico do material, discriminado na seção 5.1.2	Corte da folha PETG/Produção de visores	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Laser CNC 130 W Modelo CMA 1008
Folha de PETG estocada	1,240	kg	Cálculo da massa do lote a partir da quantidade e peso específico do material, discriminado na seção 5.1.2	Armazenagem de folhas de PETG	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: c aminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
Lote de 2 peças Tipo 1	1,217	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Impressão de peças do Tipo 1	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Impressora Creality Ender 3
Lote de 13 peças Tipo 2	0,235	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Impressão de peças do Tipo 2	Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Impressora Creality Ender 3
Filamento de PLA estocado	1,518	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Armazenagem de filamento de PLA	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: c aminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
Fita para montagem	0,027	kg	Cálculo da massa do lote e da quantidade para atender o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2	Armazenagem de rolo de Fita	Dados de distância e entregas: Período do estudo de caso: de março de 2020 a maio de 2021 Ecoinvent: 2020-2022	Dados de distância e entregas: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Ecoinvent: c aminhão da classe de tamanho 3,5-7,5 toneladas métricas de peso bruto do veículo e classe de emissões não regulamentadas
RESÍDUOS PARA TRATAMENTO							
Waste plastic, mixture (BR) market for waste plastic, mixture Cut-off, U	0,07	kg	Cálculo da massa do resíduo para o lote a partir da quantidade e peso específico do material, discriminado na seção 5.1.2	Corte da folha PETG/Produção de visores	Dados coletados no período de março de 2020 a maio de 2021 / Ecoinvent 3:	Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Dados de resíduos: média dos resíduos gerados pela Laser CNC 130 W Modelo CMA 1008 Ecoinvent: mix tecnológico de 3% de queima a céu aberto, 8% de lixão a céu aberto, 88% de aterro insalubre, 1% de incineração municipal
Waste plastic, mixture (BR) market for waste plastic, mixture Cut-off, U	0,06396	kg	Cálculo da massa do resíduo para o lote e para o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2 / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Impressão de peças do Tipo 1	Cálculos: dados coletados no período de março de 2020 a maio de 2021 / Ecoinvent 3: 2018-2022	Dados de resíduos: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Dados de resíduos: média dos resíduos gerados pelas impressoras discriminadas na seção 5.1.1 Ecoinvent: mix tecnológico de 3% de queima a céu aberto, 8% de lixão a céu aberto, 88% de aterro insalubre, 1% de incineração municipal
Waste plastic, mixture (BR) market for waste plastic, mixture Cut-off, U	0,00262	kg	Cálculo da massa do resíduo para o lote e para o fluxo de referência, discriminado na seção 5.1.2 / Utilização de inventário do Ecoinvent 3	Impressão de peças do Tipo 2	Cálculos: dados coletados no período de março de 2020 a maio de 2021 / Ecoinvent 3: 2018-2022	Dados de resíduos: Estado do Rio Grande do Sul - Brasil Ecoinvent: Brasil	Dados de resíduos: média dos resíduos gerados pelas impressoras discriminadas na seção 5.1.1 Ecoinvent: mix tecnológico de 3% de queima a céu aberto, 8% de lixão a céu aberto, 88% de aterro insalubre, 1% de incineração municipal
EMISSIONES							
Compostos orgânicos voláteis	2,08	mg	Cálculo da massa de emissões a partir do valor de referência emissões de 4,5 mg/min (AZIMI et al., 2016) e do tempo de impressão do lote de peças e do fluxo de referência	Impressão de peças do Tipo 1	Dados de tempos de impressão: coletados no período de março de 2020 a maio de 2021 Emissões de VOC: estudo de 2016	Dados de emissão: Estados Unidos Tempo de impressão: Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Dados de emissão: impressoras FDM - LulzBot, Dremel e FlashForge
Compostos orgânicos voláteis	0,35	mg	Cálculo da massa de emissões a partir do valor de referência emissões de 4,5 mg/min (AZIMI et al., 2016) e do tempo de impressão do lote de peças e do fluxo de referência	Impressão de peças do Tipo 2	Dados de tempos de impressão: coletados no período de março de 2020 a maio de 2021 Emissões de VOC: estudo de 2016	Dados de emissão: Estados Unidos Tempo de impressão: Porto Alegre, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil	Dados de emissão: impressoras FDM - LulzBot, Dremel e FlashForge

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Em relação aos inventários de transportes utilizados na etapa de entrega de matérias-primas no AM-HUB, a decisão pelo uso do inventário '*Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated {BR}*| *transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, unregulated* | *Cut-off, S*' foi subjetiva, pois não havia controle e registros para precisar os veículos utilizados. Esse é um ponto de alta incerteza na LCA, mas como o objetivo do estudo é uma avaliação de configurações que serão afetadas principalmente pela entrega do produto nos demandantes, a decisão foi considerada aceitável. Esse inventário é uma adaptação de dados coletados na África do Sul, com ajustes para refletir a situação no Brasil: considerando emissões reguladas no Brasil pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição Atmosférica Veicular) e a mistura de biodiesel no combustível utilizado no país (SIMAPRO, 2022).

O inventário '*Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 {GLO}*| *market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4* | *Cut-off, U*', utilizado nas entregas do produto nos demandantes, foi definido a partir da informação de que os *face shields* eram coletados pelos demandantes utilizando veículos leves. No Ecoinvent 3.9.1 não há inventários deste tipo de transporte com cobertura geográfica no Brasil, desta forma, foi selecionado um inventário com cobertura global e com padrão de emissões EURO 4, que equivale ao PROCONVE L6. O PROCONVE L6 define os limites de emissões vigentes no Brasil (IBAMA, 2011; DALLMANN e FAÇANHA, 2017). O inventário selecionado para o consumo de energia – '*Electricity, low voltage {BR}*| *market group for electricity, low voltage* | *Cut-off, U*' – abrange o mercado de baixa tensão no Brasil, que representa o consumidor de energia AM-HUB.

O Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida – SICV Brasil – foi consultado para complementações, mas não possui inventários que poderiam ajudar no presente estudo. No SICV Brasil está disponível um inventário de AM, mas para condições muito diferentes e com uso de material diferente nos filamentos de impressão. Os inventários de transporte disponíveis no SICV Brasil são somente com utilização de veículos de carga, e já estão disponíveis na base de dados do Ecoinvent 3.9.1.

O dado secundário, com fonte na literatura, utilizado no estudo se justifica pelo fato das impressoras 3D com tecnologia FDM liberarem compostos orgânicos voláteis (*volatile organic compounds* – VOC) e partículas ultrafinas devido ao processo de extrusão (aquecimento de polímeros) na impressão com filamento de PLA (STEINLE, 2016; AZIMI et al., 2017; SUÁREZ e DOMÍNGUEZ, 2020). O valor de referência foi de 4,5 µg/min de emissão do principal VOC quando são utilizados filamentos de PLA na

impressão 3D (o lactídeo 1,4-dioxano-2,5-diona,3,6-dimetil) (AZIMI et al., 2016). O valor de referência foi ajustado para representar as emissões nos tempos de impressão dos lotes de peças do Tipo 1 e do Tipo 2. A opção de uso deste valor de referência considerou que as impressoras utilizadas no AM-HUB são diferentes das utilizadas no estudo de Azimi et al. (2016).

A estruturação do inventário, bem como sua documentação detalhada neste estudo, permite a reprodutibilidade do estudo e dos resultados obtidos por outros pesquisadores. Por outro lado, deve-se destacar a necessidade de estudos futuros para redução de incertezas nos resultados gerados a partir da melhoria na qualidade dos dados e incorporação de variabilidade para aumentar a precisão dos resultados.

A especificidade dos dados impacta na precisão dos resultados e Bjørn et al. (2018b) apresentam uma classificação de especificidade para orientar melhorias na qualidade dos dados utilizados em um estudo de LCA: quanto maior a especificidade melhor é o dado para a representatividade da avaliação de desempenho. Avaliando os dados do inventário do presente estudo, foi identificado que os dados de consumo de energia foram calculados a partir de medidas diretas nas operações do sistema analisado e, conseqüentemente, podem ser considerados de alta especificidade. O dado de emissões de VOC, obtido na literatura, e os dados de inventário do Ecoinvent 3.9.1 são considerados de baixa especificidade, pois foram obtidos em condições diferentes da aplicada no estudo (cobertura temporal e cobertura geográfica) e com tecnologias diferentes, o que indica uma avaliação crítica na utilização dos resultados para comunicação sobre o desempenho ambiental do sistema. Os dados obtidos com especialistas nas operações de impressão e corte podem ser de alta ou de baixa especificidade, pois alguns foram baseados em registros e controles de produção e outros foram definidos subjetivamente pelos especialistas, o que orienta a necessidade de coletas de dados diretamente no sistema em estudos futuros.

Os dados coletados e os dados de inventário definidos, apresentados nos Quadros 8 e 9, foram organizados em dados de entrada e saída. Além disso, foram especificadas as quantidades de entradas e saídas totais para apoiar o levantamento do fluxo de massa e da energia consumida em cada etapa para a entrega da unidade funcional no sistema. Os dados de entrada e saída do processo do AM-HUB são apresentados na Tabela 12. O critério de corte para o balanço de massa foi de 1%, ou seja, materiais com contribuição menor do que este percentual foram excluídos das

análises, e no caso do estudo foram excluídas as emissões de compostos orgânicos voláteis.

Tabela 5.12 – Fluxos de entrada e saída do AM-HUB

Etapa					
Corte da folha PETG/Produção de visores					
	Entrada			Saída	
Material	Folha de PETG estocada (kg)	Energia (kWh)	Lote de 26 visores (kg)	Resíduo de PETG (kg)	
Quantidade	1,24	0,23	1,17	0,07	
% do Processo	100%		94%	6%	
Etapa					
Impressão de peças do Tipo 1					
	Entrada			Saída	
Material	Filamento de PLA estocado (kg)	Energia (kWh)	Lote de 2 peças Tipo 1 (kg)	Resíduo PLA (kg)	
Quantidade	1,28	10,53	1,21719	0,06396	
% do Processo	100%		95%	5%	
Etapa					
Impressão de peças do Tipo 2					
	Entrada			Saída	
Material	Filamento de PLA estocado (kg)	Energia (kWh)	Lote de 13 peças Tipo 2(kg)	Resíduo PLA (kg)	
Quantidade	0,24	1,77	0,23504	0,00262	
% do Processo	100%		99%	1%	
Etapa					
Montagem de face shields					
	Entrada				Saída
Material	Lote de 26 visores (kg)	Lote de 2 peças Tipo 1 (kg)	Lote de 13 peças Tipo 2(kg)	Fita cortada (kg)	Lote de 26 face shields (kg)
Quantidade	1,17	1,22	0,24	0,03	2,65
% do Processo	44,2%	45,9%	8,9%	1,0%	100%

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

5.3.2 Avaliação de Impacto

Conforme definido na ISO 14040 (2006), a etapa de LCIA visa compreender e avaliar a magnitude dos potenciais impactos ambientais associados a um processo ou produto. Nesta fase de avaliação do ciclo de vida, os dados do inventário são transformados por meio de modelos científicos em dados de impacto em diferentes categorias. Neste estudo foram selecionados dois métodos específicos de LCIA: Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H e CED V1.11. Os diferentes métodos têm sua série de categorias de impacto e conjunto de indicadores próprios.

A utilização de diferentes métodos permite gerar resultados em categorias de impacto ambiental complementares para comparações entre os resultados gerados do AM-HUB e AM-CLUSTER. Além disso, possibilita a geração de dados e informações para avaliar os impactos mais relevantes do sistema analisado e uma interpretação mais consistente sobre desempenho ambiental. No caso da escolha do Recipe e do CED, os resultados permitem análises dos impactos mais relevantes em

AM de acordo com estudos anteriores, apresentados nas seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.3.3: o consumo de energia e a emissão de CO₂ e de outros gases do efeito estufa.

O método Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H tem escopo global e foi utilizado para análise de questões ambientais relacionadas aos 18 indicadores disponíveis no *software* de LCA (GARCIA et al., 2018; SIMAPRO 2022): Aquecimento global; Depleção do ozônio estratosférico; Radiação ionizante; Danos à saúde humana devido à formação de ozônio; Formação de partículas finas; Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; Acidificação terrestre; Eutrofização de água doce; Eutrofização marinha; Ecotoxicidade terrestre; Ecotoxicidade de água doce; Ecotoxicidade marinha; Toxicidade cancerígena humana; Toxicidade não cancerígena humana; Uso da terra; Escassez de recursos minerais; Escassez de recursos fósseis; e Consumo de água. A categoria principal que representa o impacto da emissão de CO₂ e de outros gases do efeito estufa no Recipe é o 'Aquecimento global', caracterizado a partir do cálculo de Potencial de Aquecimento Global (GWP) (HUIJBREGTS et al., 2016; SIMAPRO, 2022).

No presente estudo optou-se pela caracterização de causa-e-efeito ambiental com indicadores de ponto médio. A opção por indicadores de ponto médio se deve a menor incerteza nos resultados dos indicadores e, também, pelo fato de não haver necessidade de indicadores de dano (ponto final) para a comparação entre as configurações de sistemas. Os indicadores de ponto médio permitem uma comparação adequada entre os cenários avaliados no estudo. Saade et al. (2020) destacam que os indicadores de ponto médio estão mais próximos dos dados de inventário e os valores são obtidos por equações matemáticas simples, que convertem substâncias (emitidas ou consumidas) em uma contribuição para uma categoria de impacto específica. Detalhes sobre a modelagem e lógicas de cálculos das categorias de impacto nesse método estão disponíveis em Huijbregts et al. (2016).

O CED é o método utilizado para calcular a demanda de energia acumulada, direta e indireta, em categorias de impacto que representam recursos energéticos renováveis e não renováveis, e de origens diferentes (SIMAPRO, 2022): Não renovável (fóssil), Não renovável (nuclear), Não renovável (biomassa), Renovável (biomassa), Renováveis (eólica, solar, geotérmica) e Renovável (água). O CED é definido pelo consumo de energia primária de um sistema independentemente do tipo de fonte de energia e pela soma do conteúdo energético de todos os recursos energéticos e fontes de energia consideradas (DETZEL e KRÜGER, 2006). Detalhes

sobre a modelagem e lógicas de cálculos das categorias de impacto nesse método estão disponíveis em Hischer et al. (2010).

O primeiro passo na LCIA é a classificação, que orienta a atribuição de resultados do inventário (LCI) para diferentes categorias de impacto, seguida da caracterização, que serve para quantificar o nível da influência dos fluxos inventariados nas categorias de impacto. Essas etapas são realizadas automaticamente no *software* SimaPro a partir da seleção dos métodos e execução dos cálculos de avaliação de impacto.

Em relação às etapas de normalização e ponderação, identificou-se que as comparações dos indicadores serão entre indicadores da mesma categoria gerados para cada configuração de AM e não serão definidas importâncias diferentes para as diferentes categorias. Desta forma, a decisão foi de que não havia necessidade de normalização e ponderação dos indicadores para atender aos objetivos do estudo proposto.

Durante a execução da modelagem do inventário no *software* SimaPro, o autor identificou a necessidade de um ajuste no modelo para uma avaliação mais coerente do desempenho ambiental das diferentes configurações (AM-HUB e AM-CLUSTER): a separação da etapa de entrega de matérias-primas e produção/montagem no AM-HUB da etapa de entrega do produto nos demandantes. Desta forma, a etapa de LCIA gerou dados de desempenho ambiental para dois modelos: um com foco na operação do AM-HUB e outro com foco na distribuição de *face shields* nas duas configurações: AM-HUB e AM-CLUSTER. Na modelagem da produção do AM-HUB foi considerada a unidade funcional definida (seção 5.1.4) – entrega de 26 unidades - e na modelagem da distribuição foi considerada a entrega total de *face shields* (16.219 unidades).

5.3.2.1 LCIA da operação do AM-HUB

Os resultados obtidos na avaliação de impacto com o método Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H são apresentados na Tabela 5.13. Como delimitação da aplicação dos métodos de LCIA foi definido que a construção de infraestrutura e emissões de longo prazo não seriam considerados para avaliação dos impactos. Os resultados apresentados estão relacionados à unidade funcional: entregar lotes de 26 produtos.

Tabela 5.13 – Resultados do método Recipe para o AM-HUB (sem distribuição)

Categoria de impacto	Unidade	PEÇA DO TIPO 1 - LOTE (2)	PEÇA DO TIPO 2 - LOTE (13)	VISOR	FITA CORTADA	TOTAL
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	2,0149072	0,33719179	0,047723049	0,000220428	2,4000425
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	4,71E-06	7,92E-07	1,06E-07	9,20E-11	5,61E-06
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,012442879	0,002093831	0,000280939	2,52E-07	0,014817901
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,003717956	0,000624149	9,54E-05	8,95E-07	0,004438357
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,003181468	0,000533088	7,45E-05	2,83E-07	0,003789383
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,003866462	0,000649126	9,92E-05	9,34E-07	0,004615728
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,006296916	0,001059104	0,00014833	5,66E-07	0,007504916
Eutrofização de água doce	kg P eq	3,84E-05	6,45E-06	8,99E-07	3,18E-09	4,58E-05
Eutrofização marinha	kg N eq	0,000115056	1,91E-05	2,90E-06	2,73E-08	0,000137038
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	2,6421282	0,44503057	0,091889547	0,002313027	3,1813614
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,001038775	0,000178098	0,000112355	6,23E-06	0,001335454
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,002659823	0,000446528	0,000118395	4,17E-06	0,003228912
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,003233976	0,000525178	0,000108087	2,76E-06	0,003870004
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,35327369	0,059349767	0,008784265	6,51E-05	0,42147284
Uso da terra	m ² a crop eq	0,31661213	0,053275687	0,00728577	1,61E-05	0,37718966
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000334225	5,71E-05	1,61E-05	6,00E-07	0,000408034
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,38170419	0,064289567	0,009449447	6,54E-05	0,45550861
Consumo de água	m ³	0,25616464	0,043103298	0,005765474	3,94E-06	0,30503735

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados para todas as categorias de impacto do método Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H. Observa-se que as categorias ‘Aquecimento Global’ e ‘Ecotoxicidade Terrestre’ apresentaram resultados absolutos maiores de emissões por kg de uma substância de referência. Para uma comparação entre categorias de impacto diferentes seria necessário realizar a normalização, mas como o objetivo do estudo é a comparação entre as mesmas categorias em cenários diferentes não foi realizado o procedimento de normalização. Na Figura 5.10 é apresentada a contribuição relativa de cada etapa operacional do AM-HUB, sendo que a impressão das peças do Tipo 1 destaca-se com sua contribuição variando em torno de 80% para todas as categorias analisadas.

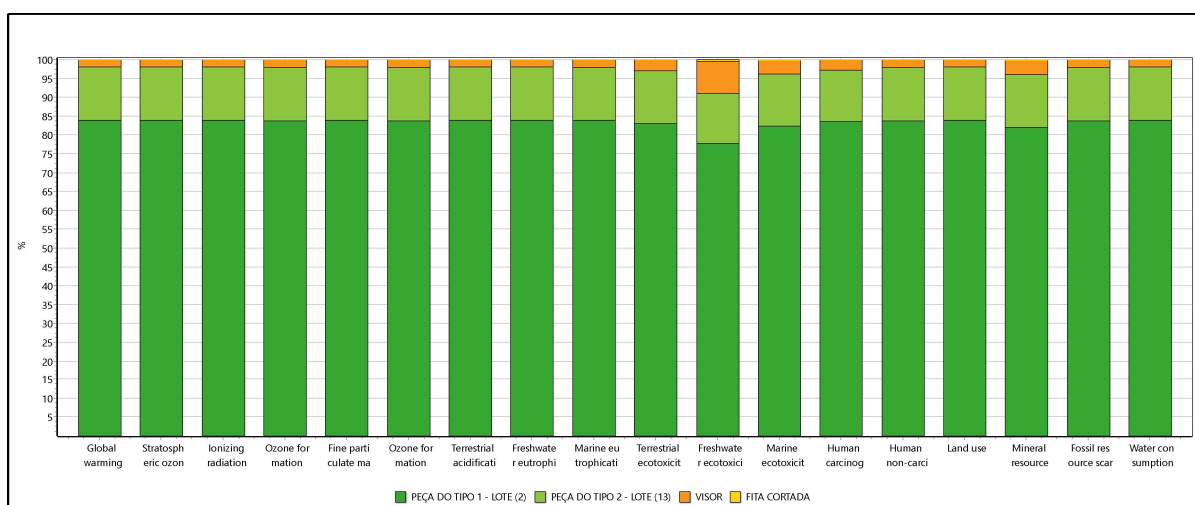


Figura 5.10 – Contribuição relativa das operações no LCIA-Recipe do AM-HUB (sem distribuição)

Fonte: *Software* SimaPro (2024)

Na Figura 5.11 é discriminada a rede de fluxo gerada no SimaPro, na qual é destacado o caminho crítico de impacto ambiental. A impressão da Peça do Tipo 1 tem uma contribuição de 83,9% no impacto em 'Aquecimento Global'. Isso se deve ao consumo de energia ser maior nesta operação de impressão de peças quando comparada ao consumo de outras operações para a montagem de *face shields*. Os impactos ambientais que contribuem com menos de 5% do impacto total foram suprimidos da Figura 5.11.

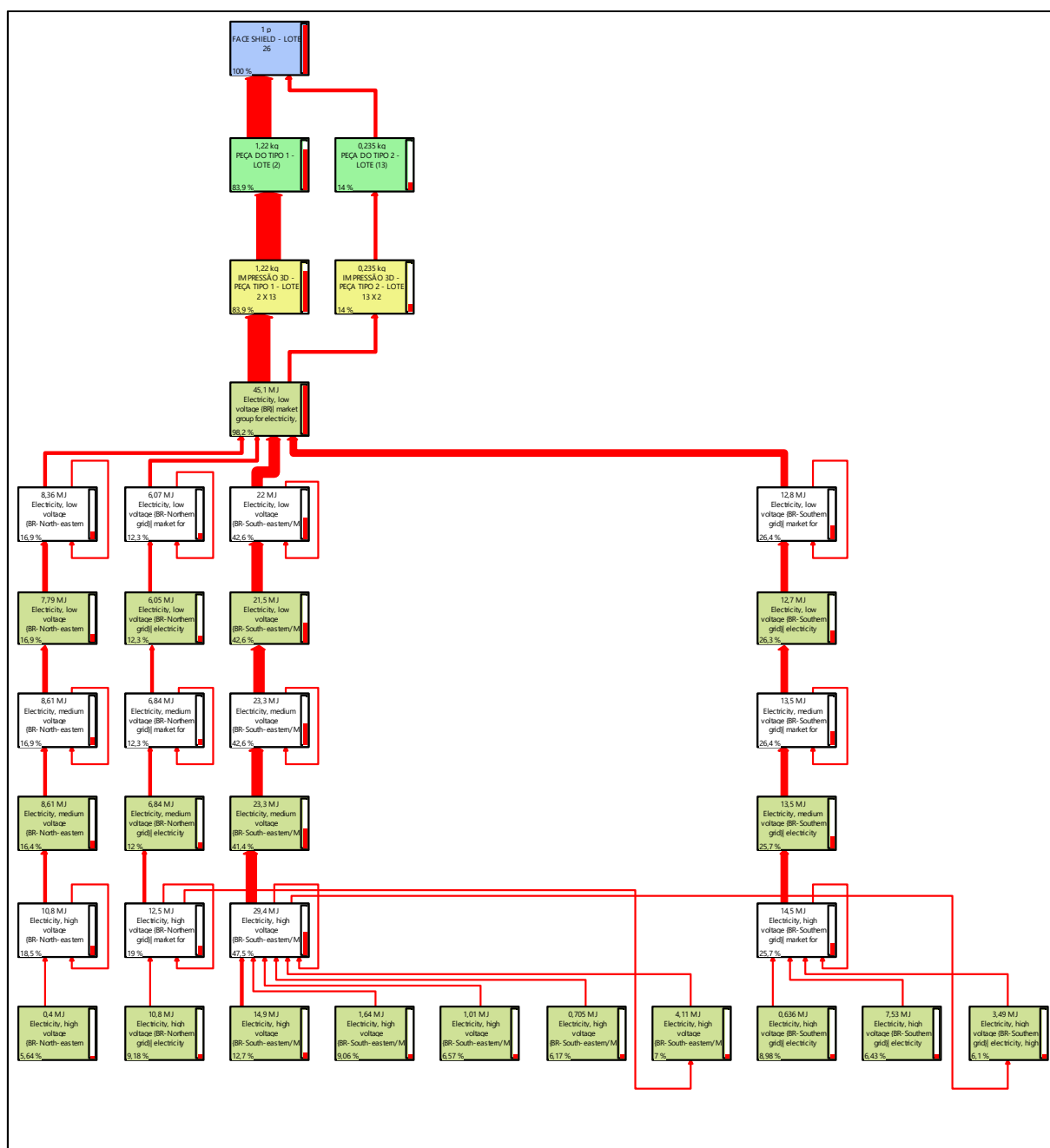


Figura 5.11 – Rede de fluxo com impacto relativo da categoria 'Aquecimento Global' no AM-HUB

Fonte: Software SimaPro (2024)

Os resultados obtidos na avaliação de impacto com o método CED V1.11 são apresentados na Tabela 5.14 e nas Figuras 5.12 e 5.13. A rede de fluxo de demanda de energia acumulada gerada no SimaPro é apresentada na Figura 5.14.

Tabela 5.14 – Resultados do método CED para o AM-HUB (sem distribuição)

Categoria de impacto	Unidade	PEÇA DO TIPO 1 - LOTE (2)	PEÇA DO TIPO 2 - LOTE (13)	VISOR	FITA CORTADA	TOTAL
Não renovável (fóssil)	MJ	17,437311	2,936937	0,43180782	0,00299726	20,809053
Não renovável (nuclear)	MJ	3,6451457	0,61336251	0,082031443	5,52E-05	4,3405949
Não renovável (biomassa)	MJ	0,045141868	0,007659882	0,001844074	5,81E-05	0,054703908
Renovável (biomassa)	MJ	10,348489	1,7411428	0,23106854	3,11E-05	12,320732
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	5,9036415	0,99328603	0,1317235	1,10E-05	7,028662
Renovável (água)	MJ	34,886361	5,8695765	0,77794256	3,40E-05	41,533914
TOTAL	MJ	72,26609	12,161965	1,6564179	0,003186682	86,087659

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

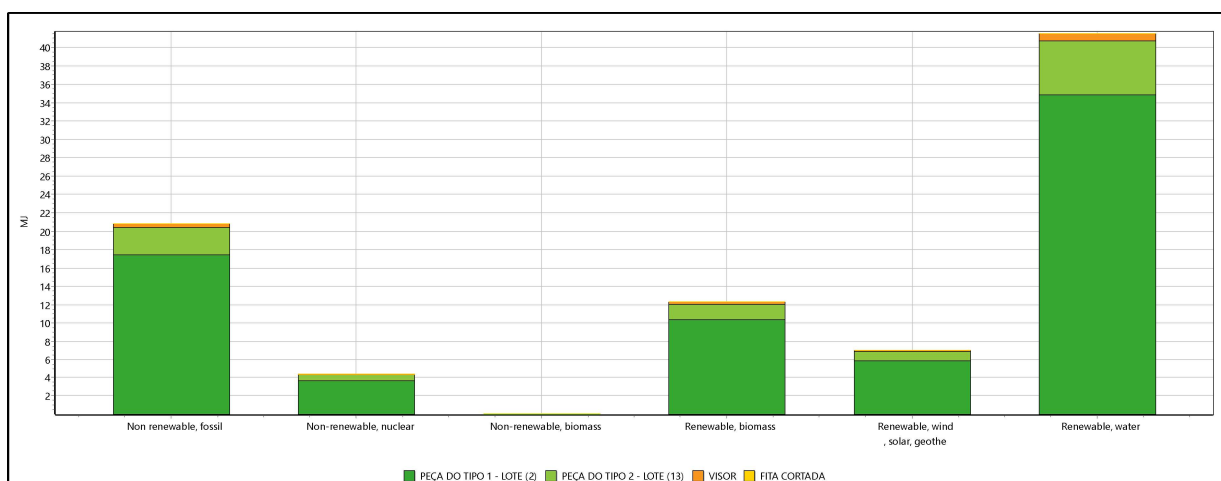


Figura 5.12 – Contribuição absoluta das operações nos resultados de CED do AM-HUB (sem distribuição)

Fonte: *Software* SimaPro (2024)

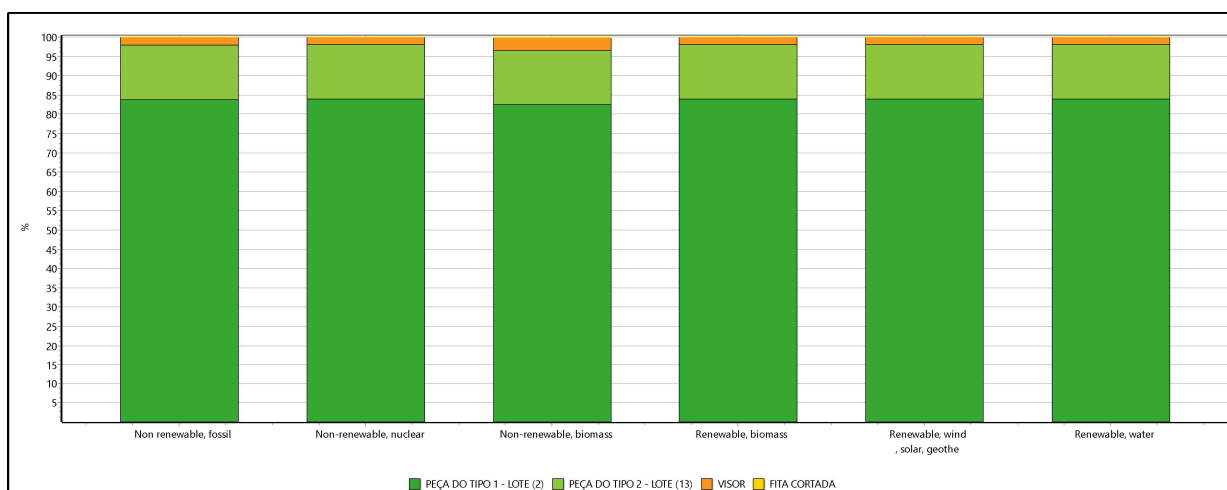


Figura 5.13 – Contribuição relativa das operações no LCIA-CED do AM-HUB (sem distribuição)

Fonte: *Software* SimaPro (2024)

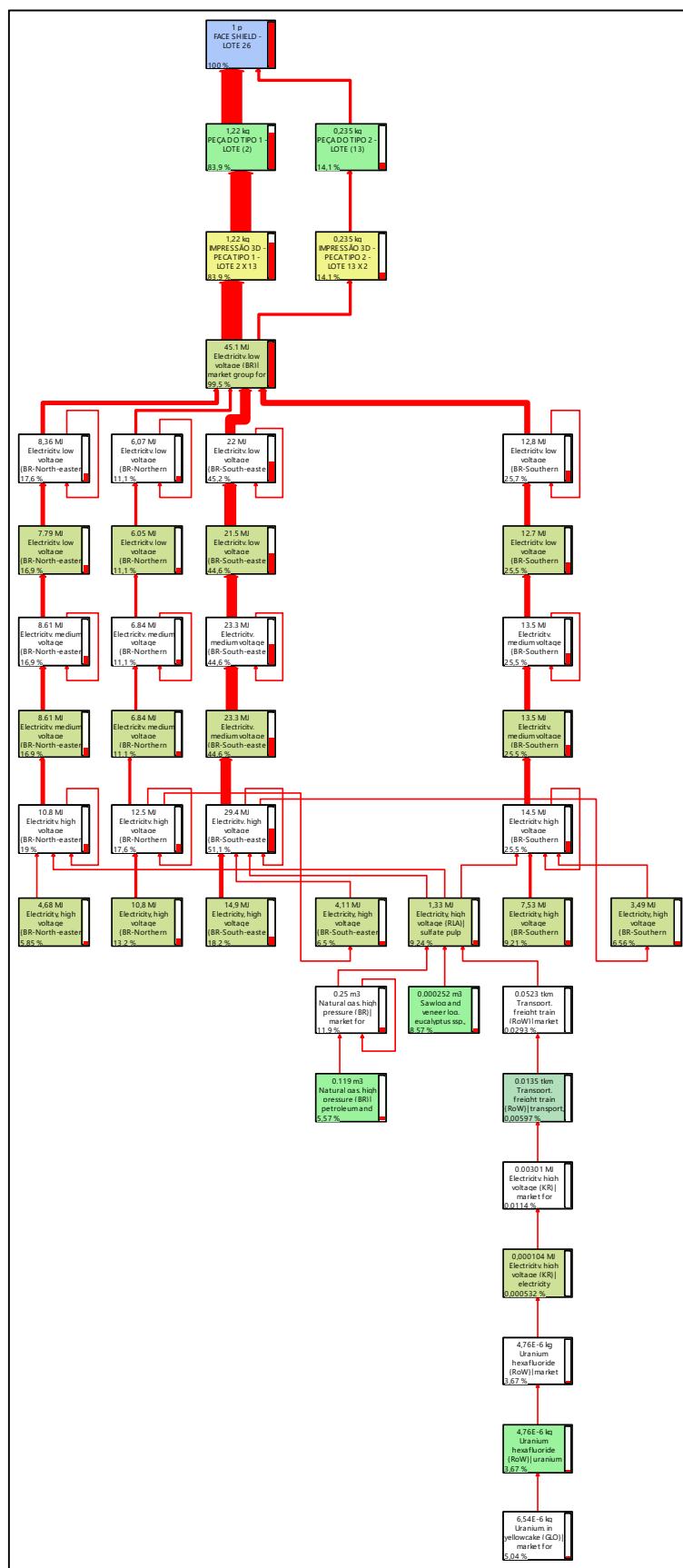


Figura 5.14 – Rede de fluxo com impacto relativo da soma de todos os recursos energéticos do CED no AM-HUB

Fonte: *Software SimaPro (2024)*

A delimitação de não consideração da construção de infraestrutura e emissões de longo prazo também foi usada na aplicação do método CED V1.11. Os resultados apresentados na Tabela 5.14 e nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 estão relacionados à unidade funcional: entregar lotes de 26 produtos. Observa-se que as categorias 'Não renovável (fóssil)' e 'Renovável (água)' apresentaram os resultados mais significativos de impacto total, e a impressão de peças do Tipo 1 destaca-se com a maior contribuição absoluta em cada categoria de impacto (Tabela 5.14 e Figura 5.12). Na Figura 5.13 é apresentada a contribuição relativa de cada etapa operacional do AM-HUB, sendo que a impressão das peças do Tipo 1 destaca-se com sua contribuição variando em torno de 83% para todas as categorias analisadas.

Os resultados apresentados na Figura 5.14 também indicam a importância de parâmetros operacionais associados à impressão de peças do Tipo 1. A rede de fluxo discrimina a contribuição relativa das operações (soma de todos os recursos energéticos das diferentes origens) nas categorias do método CED V1.11. Os impactos ambientais que contribuem com menos de 5% do impacto total foram desconsiderados na representação do fluxo e o caminho crítico está destacado na rede.

5.3.2.2 Análises de sensibilidade e de incerteza dos resultados da LCIA da operação do AM-HUB

Após a obtenção dos resultados de LCIA, uma análise de sensibilidade de mudança em dados de entrada foi realizada. É importante destacar que na LCIA os modelos de caracterização assumem condições de estado estacionário, o que implica uma relação linear de causa-e-efeito entre o aumento em um fluxo elementar e o aumento da categoria de impacto ambiental (ROSENBAUM et al., 2018).

Os efeitos de uma variação de 50% no valor inicial dos parâmetros operacionais de impressão de peças do Tipo 1 e do Tipo 2 são apresentados nas Tabelas 5.15 e 5.16. A análise indica que o principal impacto nas categorias analisadas é causado pelas variações na produção de peças do Tipo 1, em função da variação do consumo de energia nesta operação. Um aumento de 50% na produção de peças do Tipo 1 aumenta os impactos ambientais em média 42,43%. Um aumento de 50% no consumo de energia na impressão dessas peças aumenta os impactos ambientais em média

40,09%. Já aumentos de 50% na produção ou no consumo de energia da impressão de peças do Tipo 2, acarretam aumentos médios de 7,5% nos impactos ambientais.

Tabela 5.15 – Análise de sensibilidade da redução dos valores de entrada

Etapas do processo		Montagem de face shields	Impressão de peças do Tipo 1	Montagem de face shields	Impressão de peças do Tipo 2	
Entradas		Lote de 2 peças Tipo 1	Electricity, low voltage (BR) market group for electricity, low voltage Cut-off_U	Lote de 13 peças Tipo 2	Electricity, low voltage (BR) market group for electricity, low voltage Cut-off_U	
Valor inicial		1,21719 kg	10,5339 kWh	0,23504 kg	1,7726 kWh	
	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	2,4000425	2,4000425	2,4000425	
	Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	5,61E-06	5,61E-06	5,61E-06	
	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,014817901	0,014817901	0,014817901	
	Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,004438357	0,004438357	0,004438357	
	Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,003789383	0,003789383	0,003789383	
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,004615728	0,004615728	0,004615728	
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,007504916	0,007504916	0,007504916	
	Eutrofização de água doce	kg P eq	4,58E-05	4,58E-05	4,58E-05	
Categorias de impacto Recipe	Eutrofização marinha	kg N eq	0,000137038	0,000137038	0,000137038	
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	3,1813614	3,1813614	3,1813614	
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,001335454	0,001335454	0,001335454	
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,003228912	0,003228912	0,003228912	
	Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,003870004	0,003870004	0,003870004	
	Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,42147284	0,42147284	0,42147284	
	Uso da terra	m ² a crop eq	0,37718966	0,37718966	0,37718966	
	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000408034	0,000408034	0,000408034	
	Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,45550861	0,45550861	0,45550861	
	Consumo de água	m ³	0,30503735	0,30503735	0,30503735	
Categorias de impacto CED	Não renovável (fóssil)	MJ	20,809053	20,809053	20,809053	
	Não renovável (nuclear)	MJ	4,3405949	4,3405949	4,3405949	
	Não renovável (biomassa)	MJ	0,054703908	0,054703908	0,054703908	
	Renovável (biomassa)	MJ	12,320732	12,320732	12,320732	
	Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	7,028662	7,028662	7,028662	
	Renovável (água)	MJ	41,533914	41,533914	41,533914	
Input	Valor reduzido em 50%		0,608595 kg	5,26695 kWh	0,11752 kg	0,8863 kWh
	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	1,4109593	1,4286787	2,2498375	2,2519039
	Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	3,26E-06	3,26E-06	5,22E-06	5,22E-06
	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,00859662	0,008607655	0,01377121	0,013773243
	Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,002650937	0,002650937	0,004149472	0,004156906
	Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,002221028	0,002243242	0,00354525	0,00354788
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,002706197	0,002756465	0,004314904	0,004322646
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,004366433	0,00439503	0,006995403	0,006990017
	Eutrofização de água doce	kg P eq	2,67E-05	2,69E-05	4,27E-05	4,27E-05
Output	Eutrofização marinha	kg N eq	8,24602E-05	8,49584E-05	0,000130462	0,00013073
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	1,8848746	1,9936809	2,9834504	3,0019971
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,000865124	0,001150066	0,001295474	0,001345082
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,001959468	0,002162753	0,003066142	0,003099847
	Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,002450736	0,002657427	0,003805167	0,003830467
	Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,24640495	0,24987525	0,39337051	0,39390898
	Uso da terra	m ² a crop eq	0,21902865	0,21978141	0,3507001	0,35082852
	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000241129	0,000266523	0,000379707	0,000384401
	Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,2648804	0,26775119	0,42359161	0,42410729
	Consumo de água	m ³	0,17696785	0,17714672	0,28350114	0,28353215
Output	Não renovável (fóssil)	MJ	12,100649	12,232187	19,351014	19,374643
	Não renovável (nuclear)	MJ	2,5180596	2,5205025	4,0339884	4,0344202
	Não renovável (biomassa)	MJ	0,032298847	0,034824974	0,051040306	0,051497624
	Renovável (biomassa)	MJ	7,1465791	7,1482181	11,450358	11,450602
	Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	4,0768707	4,0775107	6,5321087	6,532195
	Renovável (água)	MJ	24,090898	24,093364	38,599646	38,599913
Efeito de REDUÇÃO	Aquecimento global		41,21%	40,47%	6,26%	6,17%
	Depleção do ozônio estratosférico		41,93%	41,83%	7,00%	6,99%
	Radiação ionizante		41,98%	41,91%	7,06%	7,05%
	Formação de ozônio, saúde humana		41,36%	40,27%	6,51%	6,34%
	Formação de partículas finas		41,39%	40,80%	6,44%	6,37%
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres		41,37%	40,28%	6,52%	6,35%
	Acidificação terrestre		41,82%	41,44%	6,92%	6,86%
	Eutrofização de água doce		41,68%	41,26%	6,76%	6,71%
	Eutrofização marinha		39,83%	38,00%	4,80%	4,60%
	Ecotoxicidade terrestre		40,75%	37,33%	6,22%	5,64%
	Ecotoxicidade de água doce		35,22%	13,88%	2,99%	-0,72%
	Ecotoxicidade marinha		39,31%	33,02%	5,04%	4,00%
	Toxicidade cancerígena humana		36,67%	31,33%	1,68%	1,02%
	Toxicidade não cancerígena humana		41,54%	40,71%	6,67%	6,54%
	Uso da terra		41,93%	41,73%	7,02%	6,99%
	Escassez de recursos minerais		40,90%	34,68%	6,94%	5,79%
	Escassez de recursos fósseis		41,85%	41,22%	7,01%	6,89%
	Consumo de água		41,98%	41,93%	7,06%	7,05%
	Não renovável (fóssil)		41,8%	41,2%	7,0%	6,9%
	Não renovável (nuclear)		42,0%	41,9%	7,1%	7,1%
Não renovável (biomassa)		41,0%	36,3%	6,7%	5,9%	
Renovável (biomassa)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	
Renovável (água)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 5.16 – Análise de sensibilidade do aumento dos valores de entrada

Etapas do processo		Montagem de face shields	Impressão de peças do Tipo 1	Montagem de face shields	Impressão de peças do Tipo 2	
Entradas		Lote de 2 peças Tipo 1	Electricity, low voltage [BR] market group for electricity, low voltage Cut-off, U	Lote de 13 peças Tipo 2	Electricity, low voltage [BR] market group for electricity, low voltage Cut-off, U	
Valor inicial		1,21719 kg	10,5339 kWh	0,23504 kg	1,7726 kWh	
Categorias de impacto Recipe	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	2,4000425	2,4000425	2,4000425	2,4000425
	Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	5,61E-06	5,61E-06	5,61E-06	5,61E-06
	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,014817901	0,014817901	0,014817901	0,014817901
	Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,004438357	0,004438357	0,004438357	0,004438357
	Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,003789383	0,003789383	0,003789383	0,003789383
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,004615728	0,004615728	0,004615728	0,004615728
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,007504916	0,007504916	0,007504916	0,007504916
	Eutrofização de água doce	kg P eq	4,58E-05	4,58E-05	4,58E-05	4,58E-05
	Eutrofização marinha	kg N eq	0,000137038	0,000137038	0,000137038	0,000137038
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	3,1813614	3,1813614	3,1813614	3,1813614
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,001335454	0,001335454	0,001335454	0,001335454
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,003228912	0,003228912	0,003228912	0,003228912
	Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,003870004	0,003870004	0,003870004	0,003870004
	Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,42147284	0,42147284	0,42147284	0,42147284
	Uso da terra	m ² a crop eq	0,37718966	0,37718966	0,37718966	0,37718966
	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000408034	0,000408034	0,000408034	0,000408034
	Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,45550861	0,45550861	0,45550861	0,45550861
Consumo de água	m ³	0,30503735	0,30503735	0,30503735	0,30503735	
Categorias de impacto CED	Não renovável (fóssil)	MJ	20,809053	20,809053	20,809053	20,809053
	Não renovável (nuclear)	MJ	4,3405949	4,3405949	4,3405949	4,3405949
	Não renovável (biomassa)	MJ	0,054703908	0,054703908	0,054703908	0,054703908
	Renovável (biomassa)	MJ	12,320732	12,320732	12,320732	12,320732
	Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	7,028662	7,028662	7,028662	7,028662
Renovável (água)	MJ	41,533914	41,533914	41,533914	41,533914	
Input	Valor aumentado em 50%	1,825785 kg	15,80085 kWh	0,35256 kg	2,6589 kWh	
Output	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	3,4259405	3,4080951	2,5870866	2,5850202
	Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	7,97E-06	7,96E-06	6,01E-06	6,01E-06
	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,021039957	0,02102813	0,015865458	0,015863486
	Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,006320623	0,006271987	0,004773727	0,004766293
	Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,005402613	0,0053802	0,004078429	0,004075799
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,006572801	0,006522294	0,004964141	0,004956398
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,01066358	0,010634586	0,008044687	0,008040073
	Eutrofização de água doce	kg P eq	6,51E-05	6,49E-05	4,91E-05	4,91E-05
	Eutrofização marinha	kg N eq	0,00019752	0,000195015	0,00014952	0,000149251
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	4,5271003	4,4181421	3,4285568	3,4100101
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,001903938	0,001618974	0,001473602	0,001423994
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,004619388	0,004415965	0,003512746	0,003479041
	Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,005684828	0,005477959	0,004330434	0,004305134
	Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,59969164	0,59619933	0,45273037	0,4521919
	Uso da terra	m ² a crop eq	0,53565245	0,53487963	0,40398486	0,40385644
	Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000575367	0,000549956	0,000436794	0,0004321
	Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,64659866	0,64370398	0,48789212	0,48737644
Consumo de água	m ³	0,43314193	0,43294677	0,32661178	0,32658077	
Output	Não renovável (fóssil)	MJ	29,538603	29,405973	22,288451	22,264822
	Não renovável (nuclear)	MJ	6,1633396	6,1606648	4,6474553	4,6470236
	Não renovável (biomassa)	MJ	0,077442389	0,074913778	0,058701492	0,058244174
	Renovável (biomassa)	MJ	17,495449	17,493151	13,191797	13,191553
	Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	9,9807297	9,9797135	7,5255638	7,5254775
Renovável (água)	MJ	58,978544	58,973855	44,470222	44,469955	
Efeito de AUMENTO	Aquecimento global		42,74%	42,00%	7,79%	7,71%
	Depleção do ozônio estratosférico		42,05%	41,95%	7,13%	7,11%
	Radiação ionizante		41,99%	41,91%	7,07%	7,06%
	Formação de ozônio, saúde humana		42,41%	41,31%	7,56%	7,39%
	Formação de partículas finas		42,57%	41,98%	7,63%	7,56%
	Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres		42,40%	41,31%	7,55%	7,38%
	Acidificação terrestre		42,09%	41,70%	7,19%	7,13%
	Eutrofização de água doce		42,25%	41,82%	7,34%	7,28%
	Eutrofização marinha		44,14%	42,31%	9,11%	8,91%
	Ecotoxicidade terrestre		42,30%	38,88%	7,77%	7,19%
	Ecotoxicidade de água doce		42,57%	21,23%	10,34%	6,63%
	Ecotoxicidade marinha		43,06%	36,76%	8,79%	7,75%
	Toxicidade cancerígena humana		46,89%	41,55%	11,90%	11,24%
	Toxicidade não cancerígena humana		42,28%	41,46%	7,42%	7,29%
	Uso da terra		42,01%	41,81%	7,10%	7,07%
	Escassez de recursos minerais		41,01%	34,78%	7,05%	5,90%
	Escassez de recursos fósseis		41,95%	41,32%	7,11%	7,00%
Consumo de água		42,00%	41,93%	7,07%	7,06%	
Não renovável (fóssil)		42,0%	41,3%	7,1%	7,0%	
Não renovável (nuclear)		42,0%	41,9%	7,1%	7,1%	
Não renovável (biomassa)		41,6%	36,9%	7,3%	6,5%	
Renovável (biomassa)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	
Renovável (água)		42,0%	42,0%	7,1%	7,1%	

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Os parâmetros citados devem ser gerenciados em análises de desempenho ambiental do sistema analisado, pois variações neles afetam as conclusões sobre o impacto ambiental gerado com os valores utilizados na modelagem original. Além do cuidado com a sensibilidade do modelo a variações nos parâmetros operacionais, no momento da interpretação dos resultados e de conclusões sobre o desempenho ambiental, a incerteza dos dados de entrada deve ser avaliada. Quanto maior for a incerteza, tanto menor será a confiabilidade desse resultado.

No *software* SimaPro está disponível um módulo de análise de incertezas que utiliza simulação de Monte Carlo para análises dos dados de inventário e dos resultados nas categorias de impacto. A base de dados do Ecoinvent 3.9.1 utiliza informações que integram incerteza medida ou estimada com uma incerteza adicional definida a partir de uma matriz de Pedigree, que considera confiabilidade, abrangência, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica. A partir da matriz, cada material inventariado tem um valor de desvio-padrão relativo calculado. Detalhes sobre os cálculos de incerteza na base de dados Ecoinvent estão disponíveis em Weidema et al. (2013).

As simulações de Monte Carlo permitem avaliar a confiabilidade do resultado de uma medição em um intervalo de confiança determinado. No presente estudo foi adotado o coeficiente de confiança de 95% para a análise da incerteza gerada pelos dados de inventário do Ecoinvent 3.9.1 selecionados para a modelagem do AM-HUB. As simulações forneceram informações sobre a média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, quantis (2,5% e 97,5%) e o erro-padrão médio, geradas a partir de 1.000 rodadas de simulação.

As simulações de Monte Carlo também geraram: (i) gráficos de distribuição de probabilidade para exemplificar os resultados das simulações realizadas no *software* de LCA (Figuras 5.15 e 5.16); (ii) gráficos das incertezas médias e variação percentual dos quantis em relação à média (Figuras 5.17 e 5.18); e (iii) uma tabela com as estatísticas descritivas da incerteza para cada categoria de impacto considerada na análise do AM-HUB (Tabela 5.17). Analisando os resultados associados às incertezas envolvidas, pode-se afirmar que é alto o grau de incerteza na maioria das categorias de impacto, o que orienta a necessidade de estudos futuros para aumentar a precisão em algumas categorias de impacto.

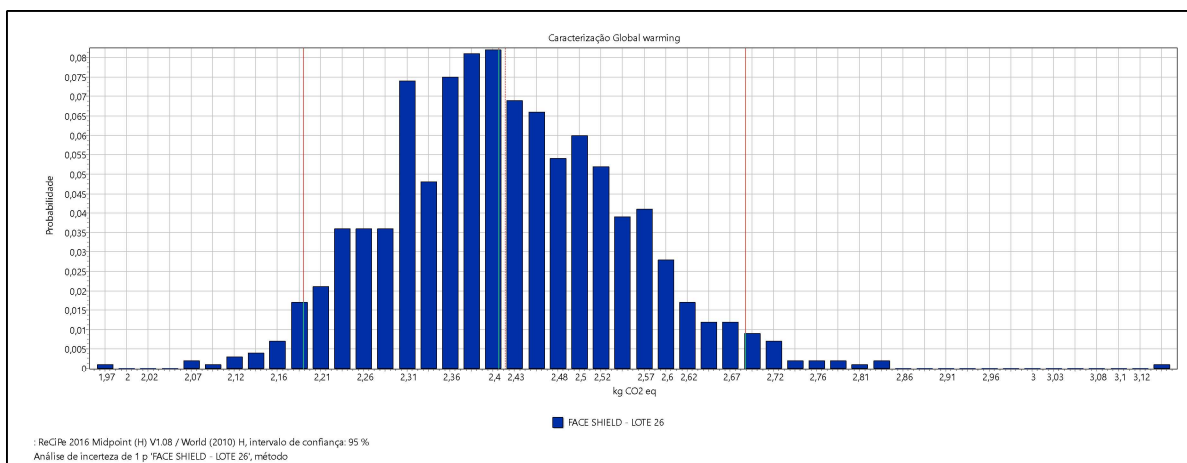


Figura 5.15 – Incerteza do resultado para a categoria 'Aquecimento global' no AM-HUB

Fonte: Software SimaPro (2024)

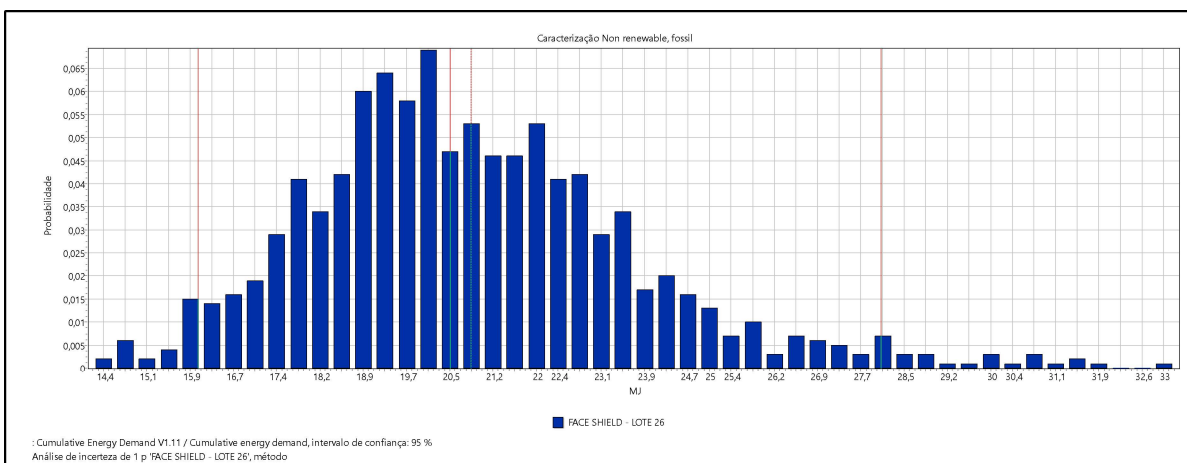


Figura 5.16 – Incerteza do resultado para a categoria 'Não renovável (fóssil)' no AM-HUB

Fonte: Software SimaPro (2024)

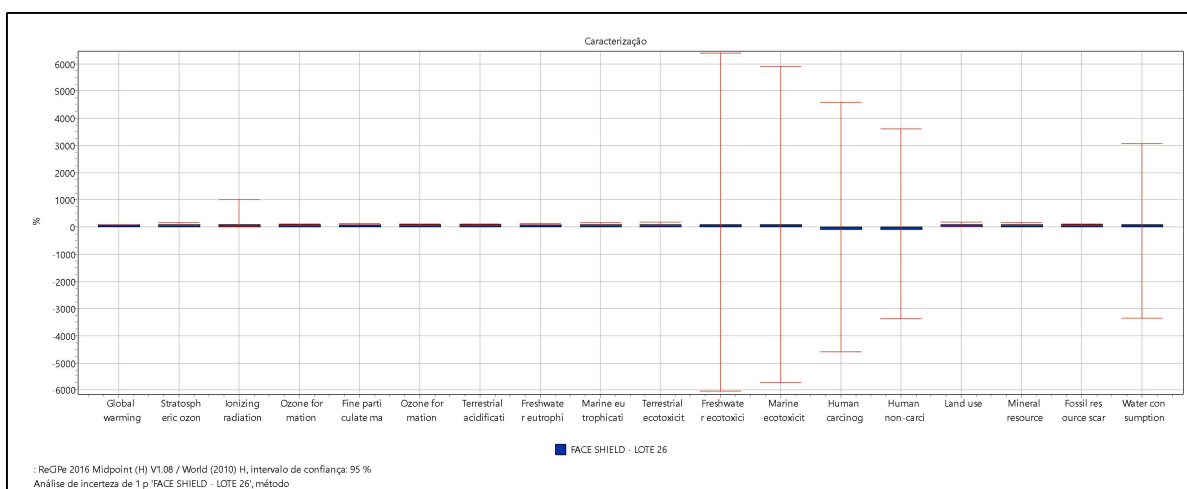


Figura 5.17 – Incerteza média e quantis da distribuição de probabilidade dos resultados do AM-HUB nas categorias do ReCiPe

Fonte: Software SimaPro (2024)

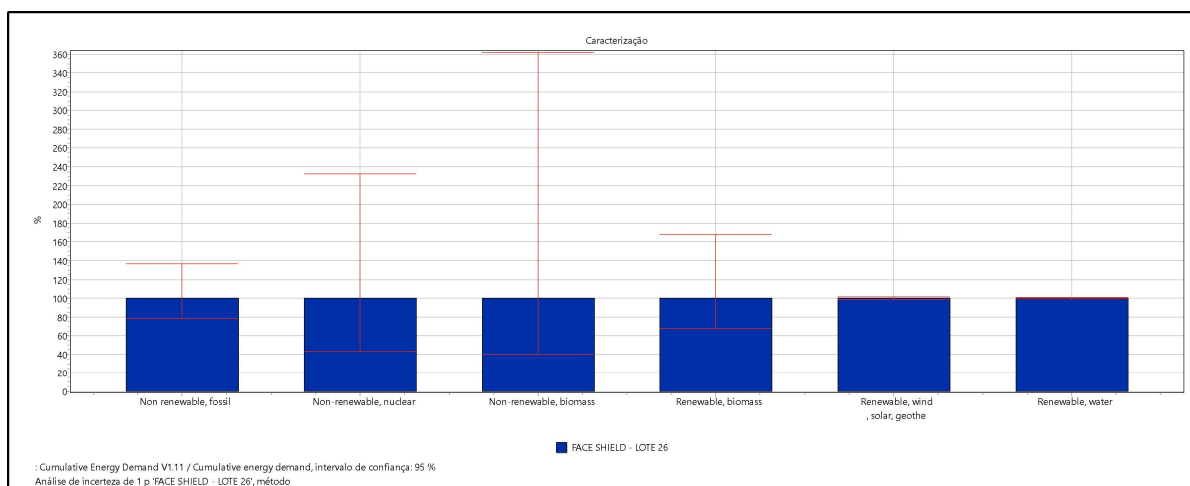


Figura 5.18 – Incerteza média e quantis da distribuição de probabilidade dos resultados do AM-HUB nas categorias do CED

Fonte: *Software SimaPro* (2024)

Tabela 5.17 – Resultados da análise de incertezas para os resultados do AM-HUB

Categoria de Impacto	Unidade	Média	Mediana	Desvio-padrão	Coefficiente de Variação	Quantil 2,5%	Quantil 97,5%	Erro-padrão médio
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	2,41720	2,41001	0,12887	5,33%	2,19271	2,68439	0,00408
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	5,61E-06	5,42E-06	1,36E-06	24,30%	3,66E-06	9,00E-06	4,31E-08
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,23750	0,11903	0,36448	153,47%	0,02047	1,19742	0,01153
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,00447	0,00442	0,00043	9,58%	0,00375	0,00545	1,35E-05
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,00378	0,00368	0,00057	15,13%	0,00303	0,00530	1,81E-05
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,00464	0,00460	0,00044	9,47%	0,00389	0,00565	1,39E-05
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,00751	0,00746	0,00053	7,02%	0,00669	0,00868	1,67E-05
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,00107	0,00103	0,00020	18,63%	0,00084	0,00154	6,29E-06
Eutrofização marinha	kg N eq	0,00039	0,00037	1,15E-04	29,52%	0,00025	0,00066	3,63E-06
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	3,26464	3,02471	1,03542	31,72%	2,06204	5,76813	0,03274
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,01457	0,04819	1,49082	10228,76%	-2,92930	3,07757	0,04714
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,03441	0,03615	1,05558	3067,66%	-2,07892	2,12333	0,03338
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	-0,90144	-1,95724	46,63444	-5173,31%	-89,53798	89,45084	1,47471
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	-704,99416	-2206,56580	40327,19200	-5720,22%	-74294,77000	79271,74400	1275,25780
Uso da terra	m ² a crop eq	0,38099	0,37578	0,17269	45,33%	0,05829	0,74244	0,00546
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,00041	0,00039	9,76E-05	23,96%	0,00027	0,00065	3,09E-06
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,45968	0,45459	0,06374	13,87%	0,35686	0,60098	0,00202
Consumo de água	m ³	0,43193	0,88540	14,75811	3416,81%	-29,68027	27,23113	0,46669
Não renovável (fóssil)	MJ	20,65373	20,27448	2,81308	13,62%	16,24616	26,68999	0,08896
Não renovável (nuclear)	MJ	4,31266	3,87549	2,09359	48,55%	1,69783	9,41639	0,06621
Não renovável (biomassa)	MJ	0,05437	0,04191	0,03973	73,08%	0,01715	0,16044	0,00126
Renovável (biomassa)	MJ	12,42206	11,77817	3,14103	25,29%	8,40120	21,45161	0,09933
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	7,02951	7,02841	0,05818	0,83%	6,91272	7,14208	0,00184
Renovável (água)	MJ	41,52769	41,52500	0,14532	0,35%	41,24801	41,80808	0,00460

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do *Software SimaPro* (2024)

5.3.2.3 LCIA da distribuição do produto

O fluxo de distribuição de *face shields* foi estruturado de forma diferente da do fluxo de produção no AM-HUB. Neste fluxo não foi considerada a unidade funcional de entregar 26 produtos, pois foram utilizados os dados de entrega para os demandantes, discriminados na Tabela 5.3 (seção 5.1.3) e no APÊNDICE B.

O modelo desenvolvido considerou o inventário '*Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 {GLO}*' market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 | *Cut-off, U*', apresentado na seção 5.3.1 e que só considera a distância percorrida para a geração dos resultados de impacto ambiental. Desta forma, foram consideradas as distâncias entre o AM-HUB e os demandantes e o número de entregas em cada demandante, o que gerou a simulação de 77 cenários de entrega, discriminados no APÊNDICE T. A mesma lógica foi utilizada na simulação das entregas com a organização AM-CLUSTER, só que com distâncias ajustadas em função da organização do sistema em 5 *clusters* e apresentadas no APÊNDICE J. A clusterização e suposições para a tomada de decisão da configuração utilizada foram apresentadas na seção 5.2.1.3.

Os resultados obtidos na avaliação de impacto com o método Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H e com o CED V1.11 são apresentados no APÊNDICE T. Como delimitação da aplicação dos métodos de LCIA foi definido que a construção de infraestrutura não seria considerada para avaliação dos impactos. Os resultados agregados por categoria de impacto de todas as entregas (77 cenários de entrega que somam o total de 16.219 produtos entregues) são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Resultados de LCIA para as duas configurações de distribuição

Categorias de impacto	Unidades	Resultados AM-HUB	Resultados AM-CLUSTER
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	345,126229	112,5660048
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	0,000137251	4,47657E-05
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,088867331	0,028984874
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,303418016	0,098962499
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,122519436	0,039960809
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,373030493	0,12166723
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,322283046	0,105115497
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,000622852	0,000203149
Eutrofização marinha	kg N eq	0,007366713	0,002402719
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	1467,259928	478,5599475
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,351553285	0,114662247
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	1,413176818	0,460920252
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,208691759	0,068066683
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	26,73403003	8,71954289
Uso da terra	m ² a crop eq	0,176979608	0,057723482
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,04134839	0,013486147
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	97,61856192	31,83916672
Consumo de água	m ³	0,166493395	0,05430331
Não renovável (fóssil)	MJ	4469,396931	1456,646288
Não renovável (nuclear)	MJ	21,56040538	7,026873006
Não renovável (biomassa)	MJ	0,014300656	0,004660807
Renovável (biomassa)	MJ	3,426177249	1,116644691
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	3,309663568	1,078671067
Renovável (água)	MJ	6,250188167	2,037033962

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

A reconfiguração em *clusters* com produtores de *face shields* localizados próximos aos centróides acarretou uma redução de 67,4% na distância percorrida: na distribuição com o AM-HUB foi percorrido um total de 1.510 km para a realização de todas as entregas; no AM-CLUSTER foi percorrido um total de 492,5 km. Como as categorias de impacto foram calculadas com base em um inventário que considera somente a distância de transporte, os resultados das categorias de impacto também sofreram uma redução percentual de 67,4%.

5.3.2.4 Análises de sensibilidade e de incertezas dos resultados da LCIA da distribuição do produto

Após a obtenção dos resultados de LCIA, uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto de mudança em dados de entrada do sistema de transporte foi realizada a partir da análise dos resultados obtidos e apresentados no APÊNDICE T. O único parâmetro de entrada neste caso é a distância entre produtor e demandante, que foi variada arbitrariamente para avaliação da variação nos resultados. A variação realizada foi de 50% no valor da distância de entrega, o que gerou uma variação de 50% nas categorias de impacto. Isso se deve à linearidade da relação *input-output* nos modelos de caracterização utilizados no *software*. Neste caso o percentual de variação do parâmetro de entrada é o mesmo percentual de variação nos resultados das categorias de impacto.

Em relação à análise de incerteza, as simulações de Monte Carlo no SimaPro forneceram informações, geradas a partir de 1.000 rodadas de simulação, sobre a média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, quantis (2,5% e 97,5%) e o erro-padrão médio. As simulações no SimaPro foram realizadas para vários cenários de distância, mas os resultados apresentaram pouca variação e, desta forma, foi selecionado um cenário de referência (15,4 km) para apresentação dos resultados e análise.

As simulações de Monte Carlo geraram: (i) gráficos de distribuição de probabilidade para exemplificar os resultados das simulações realizadas no *software* de LCA (Figuras 5.19 e 5.20); (ii) gráficos das incertezas médias e variação percentual dos quantis em relação à média (Figuras 5.21 e 5.22); e (iii) uma tabela com as estatísticas descritivas da incerteza para cada categoria de impacto considerada na análise do AM-HUB (Tabela 5.19). Neste caso também foram identificadas categorias

de impacto com alta incerteza, o que orienta a necessidade de estudos futuros para aumentar a precisão em algumas categorias de impacto.

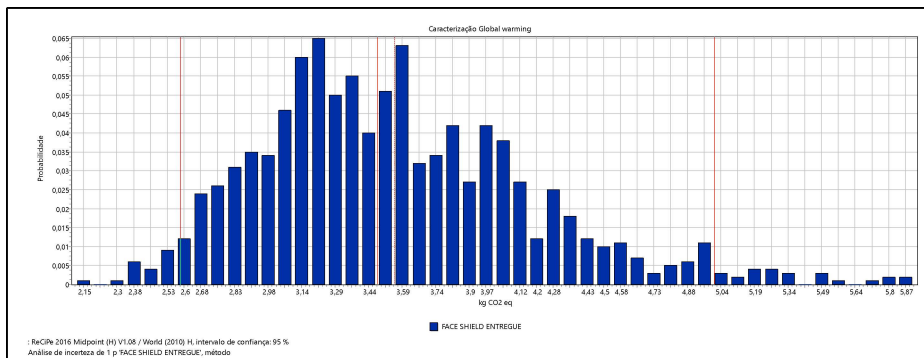


Figura 5.19 – Incerteza do resultado para a categoria ‘Aquecimento global’ na distribuição

Fonte: *Software SimaPro (2024)*

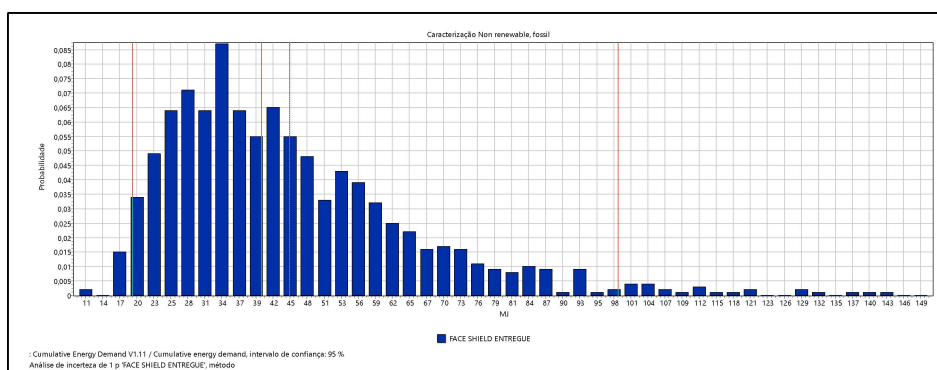


Figura 5.20 – Incerteza do resultado para a categoria ‘Não renovável (fóssil)’ na distribuição

Fonte: *Software SimaPro (2024)*

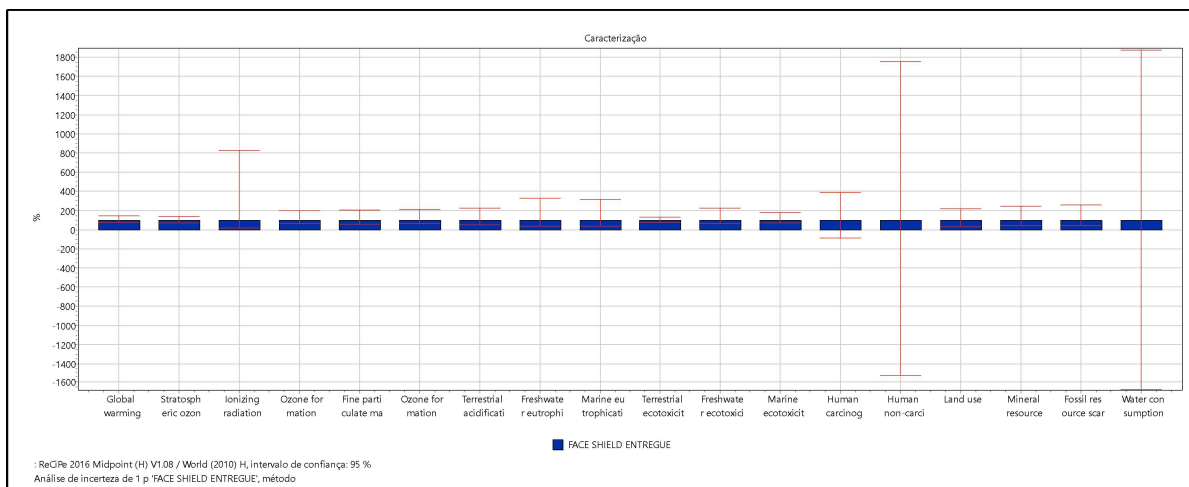


Figura 5.21 – Incerteza média e quantis da distribuição de probabilidade dos resultados nas categorias do Recipe para a distribuição

Fonte: *Software SimaPro (2024)*

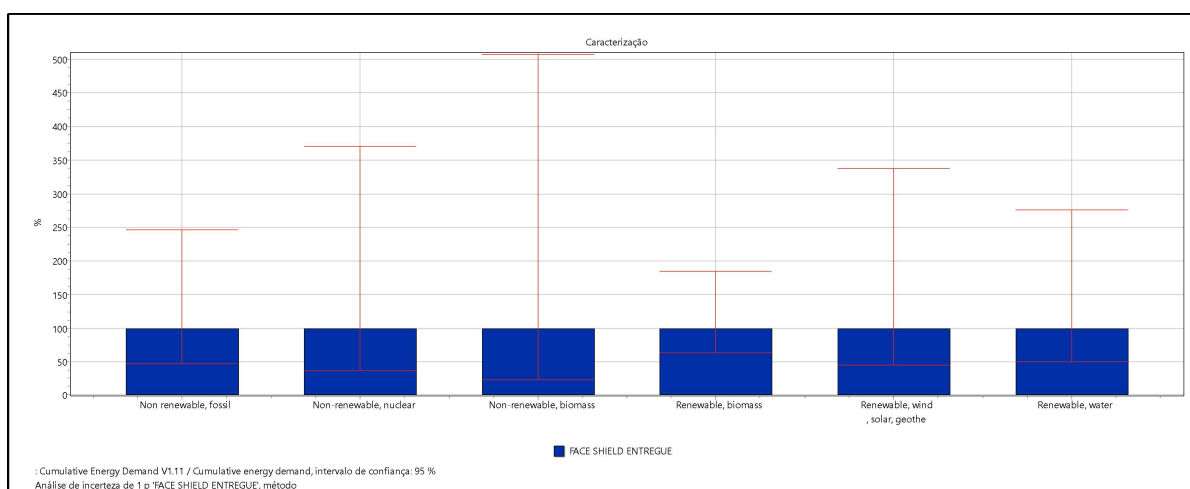


Figura 5.22 – Incerteza média e quantis da distribuição de probabilidade dos resultados nas categorias do CED para a distribuição

Fonte: Software SimaPro (2024)

Tabela 5.19 – Resultados da análise de incertezas para os resultados de distribuição

Categoria de Impacto	Unidade	Média	Mediana	Desvio-padrão	Coefficiente de Variação	Quantil 2,5%	Quantil 97,5%	Erro-padrão médio
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	0,00128	0,00118	0,00044	34,40%	0,00071	0,00242	1,39E-05
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	1,02498	0,90658	0,48621	47,44%	0,41873	2,34711	0,01538
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,00580	0,00526	0,00222	38,27%	0,00326	0,01173	7,02E-05
Formação de ozônio, saúde humana	kg NO _x eq	3,50E-05	2,86E-05	2,29E-05	65,42%	1,07E-05	9,47E-05	7,23E-07
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	3,55690	3,48054	0,61548	17,30%	2,58707	5,00458	0,01946
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NO _x eq	0,00417	0,00354	0,00482	115,63%	-0,00326	0,01381	0,00015
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,40210	0,36739	2,93119	728,97%	-5,62821	6,45533	0,09269
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,01218	0,00624	0,01946	159,76%	0,00089	0,05170	0,00062
Eutrofização marinha	kg N eq	0,00185	0,00172	0,00087	46,83%	0,00053	0,00381	2,74E-05
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	0,01741	0,01647	0,00457	26,26%	0,01162	0,02968	0,00014
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	8,01E-05	6,73E-05	4,60E-05	57,40%	0,00003	0,00021	1,45E-06
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,00044	0,00039	0,00019	44,54%	0,00018	0,00095	6,13E-06
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,00315	0,00293	0,00105	33,34%	0,00186	0,00587	3,32E-05
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,00387	0,00358	0,00133	34,51%	0,00223	0,00746	4,22E-05
Uso da terra	m ² crop eq	1,40E-06	1,38E-06	2,30E-07	16,37%	1,01E-06	1,95E-06	7,26E-09
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,00337	0,00307	0,00132	39,24%	0,00165	0,00690	4,19E-05
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	15,11176	14,84296	2,24512	14,86%	11,62239	20,23188	0,07100
Consumo de água	m ³	0,00349	0,00491	0,04513	1293,25%	-0,08201	0,09193	0,00143
Não renovável (fóssil)	MJ	0,00014	0,00010	0,00015	103,48%	0,00002	4,98E-04	4,62E-06
Não renovável (nuclear)	MJ	0,22359	0,17636	0,15691	70,18%	0,06565	0,65478	0,00496
Não renovável (biomassa)	MJ	44,85660	40,25292	20,27986	45,21%	19,07362	98,89390	0,64131
Renovável (biomassa)	MJ	0,03514	0,03312	0,01050	29,89%	0,02113	0,06108	0,00033
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	0,06430	0,05550	0,03185	49,54%	0,02794	0,15353	0,00101
Renovável (água)	MJ	0,03424	0,02804	0,02122	61,99%	0,01279	0,09479	0,00067

Fonte: Elaborada pelo autor com dados do Software SimaPro (2024)

5.3.2.5 Comparação entre o AM-HUB e o AM-CLUSTER

Nesta etapa são comparados os resultados das categorias de impacto para o sistema completo (recebimento de matérias-primas, produção de componentes, montagem de produtos e distribuição). Os resultados apresentados nas seções

5.3.2.1 e 5.3.2.2 foram compilados para a análise, mas foram definidos alguns ajustes e delimitações para permitir a comparação dos resultados.

Em relação aos dados de impacto ambiental de recebimento de matérias-primas e operações no AM-HUB (Tabelas 5.13 e 5.14 da seção 5.3.2.1), os resultados estão relacionados à unidade funcional: entregar lotes de 26 produtos. Como os resultados gerados para a etapa de distribuição do produto estão estruturados para refletir todas as entregas realizadas dos 16.219 *face shields* demandados, os resultados das Tabelas 5.13 e 5.14 foram multiplicados por 624. Esse é número de vezes que são feitas entregas de lotes de 26 unidades para atender a demanda total de 16.219 itens. Os resultados ajustados são apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Resultados ajustados de LCIA para o AM-HUB (sem distribuição)

Categorias de impacto	Unidade	Resultados da produção de um lote (unidade funcional: 26 unidades)	Resultados da produção total (624 lotes de 26 unidades)
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	2,4000425	1497,62652
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	5,60846E-06	0,003499679
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,014817901	9,246370224
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,004438357	2,76953483
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	0,003789383	2,364575179
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	0,004615728	2,880214522
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,007504916	4,683067584
Eutrofização de água doce	kg P eq	4,57689E-05	0,02855981
Eutrofização marinha	kg N eq	0,000137038	0,0855114
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	3,1813614	1985,169514
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,001335454	0,833323421
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,003228912	2,014840838
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,003870004	2,414882746
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	0,42147284	262,9990522
Uso da terra	m ² a crop eq	0,37718966	235,3663478
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,000408034	0,254613391
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,45550861	284,2373726
Consumo de água	m ³	0,30503735	190,3433064
Não renovável (fóssil)	MJ	20,809053	12984,84907
Não renovável (nuclear)	MJ	4,3405949	2708,531218
Não renovável (biomassa)	MJ	0,054703908	34,13523859
Renovável (biomassa)	MJ	12,320732	7688,136768
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	7,028662	4385,885088
Renovável (água)	MJ	41,533914	25917,16234

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

Os dados ajustados (Tabela 5.20) foram somados aos resultados das categorias de impacto gerados na LCIA das configurações AM-HUB e AM-CLUSTER para a etapa de distribuição, apresentados na Tabela 5.18 (seção 5.3.2.2). Para realizar a soma dos impactos, discriminados nas Tabelas 5.18 e 5.20, foi definida uma delimitação importante: independentemente de onde fossem produzidas as peças, no AM-HUB ou em centros de serviços (produtor) dos *clusters*, o impacto total de

recebimento de matérias-primas e das operações de produção para a produção de 16.219 *face shields* é o mesmo. Trabalhos futuros podem tratar das especificidades de cada centro de serviço em relação: (i) aos fornecedores de matérias-primas (localização e carga transportada), (ii) à eficiência dos equipamentos utilizados em cada centro de serviço, (iii) à tecnologia utilizada em cada centro e (iv) ao consumo de energia em cada centro. Desta forma, o sistema real poderá ser representado de forma mais precisa, reduzindo a incerteza nos resultados obtidos em futuras avaliações de desempenho ambiental.

Os resultados finais (soma dos impactos discriminados nas Tabelas 5.18 e 5.20) são apresentados na Tabela 5.21, que discrimina: (i) a contribuição das duas fases do sistema (recebimento-produção e distribuição), (ii) o impacto total gerado para cada categoria e (iii) a redução percentual no impacto ambiental de cada categoria com a mudança do AM-HUB para o AM-CLUSTER.

Tabela 5.21 – Resultados finais de LCIA para o AM-HUB e o AM-CLUSTER

Categorias de impacto	Unidade	Resultados da produção total (624 lotes de 26 unidades)	Resultados da distribuição na configuração AM-HUB	Resultados da distribuição na configuração AM-CLUSTER	Resultados finais da configuração AM-HUB	Resultados finais da configuração AM-CLUSTER	Redução percentual
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	1497,62652	345,126229	112,5660048	1842,752749	1610,192525	12,62%
Depleção do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	0,003499679	0,000137251	4,47657E-05	0,00363693	0,003544444	2,54%
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	9,246370224	0,08867331	0,028984874	9,335237555	9,275355098	0,64%
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	2,76953483	0,303418016	0,098962499	3,072952847	2,868497329	6,65%
Formação de partículas finas	kg PM2.5 eq	2,364575179	0,122519436	0,039960809	2,487094615	2,404535988	3,32%
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	2,880214522	0,373030493	0,12166723	3,253245015	3,001881752	7,73%
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	4,683067584	0,322283046	0,105115497	5,00535063	4,788183081	4,34%
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,02855981	0,000622852	0,000203149	0,029182662	0,028762959	1,44%
Eutrofização marinha	kg N eq	0,0855114	0,007366713	0,002402719	0,092878113	0,087914119	5,34%
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	1985,169514	1467,259928	478,5599475	3452,429442	2463,729461	28,64%
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,833323421	0,351553285	0,114662247	1,184876706	0,947985668	19,99%
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	2,014840838	1,413176818	0,460920252	3,428017657	2,47576109	27,78%
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	2,414882746	0,208691759	0,068066683	2,623574505	2,482949429	5,36%
Toxicidade não cancerígena humana	kg 1,4-DCB	262,9990522	26,73403003	8,71954289	289,7330822	271,7185951	6,22%
Uso da terra	m ² a crop eq	235,3663478	0,176979608	0,057723482	235,5433274	235,4240713	0,05%
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,254613391	0,04134839	0,013486147	0,295961781	0,268099538	9,41%
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	284,2373726	97,61856192	31,83916672	381,8559346	316,0765394	17,23%
Consumo de água	m ³	190,3433064	0,166493395	0,05430331	190,5097998	190,3976097	0,06%
Não renovável (fóssil)	MJ	12984,84907	4469,396931	1456,646288	17454,246	14441,49536	17,26%
Não renovável (nuclear)	MJ	2708,531218	21,56040538	7,026873006	2730,091623	2715,558091	0,53%
Não renovável (biomassa)	MJ	34,13523859	0,014300656	0,004660807	34,14953925	34,1398994	0,03%
Renovável (biomassa)	MJ	7688,136768	3,426177249	1,116644691	7691,562945	7689,253413	0,03%
Renováveis (eólica, solar, geotérmica)	MJ	4385,885088	3,309663568	1,078671067	4389,194752	4386,963759	0,05%
Renovável (água)	MJ	25917,16234	6,250188167	2,037033962	25923,41252	25919,19937	0,02%

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

Na Tabela 5.21 foram destacados (em negrito) os resultados das categorias de impacto que tiveram reduções percentuais maiores do que 10% com a mudança da configuração AM-HUB para a AM-CLUSTER: ‘Aquecimento global’, ‘Ecotoxicidade terrestre’, ‘Ecotoxicidade de água doce’, ‘Ecotoxicidade marinha’, ‘Escassez de recursos fósseis’ e ‘Não renovável (fóssil)’. Essas reduções são destacadas na Figura 23, que apresenta a redução (%) do impacto total da categoria com a utilização da configuração AM-CLUSTER.

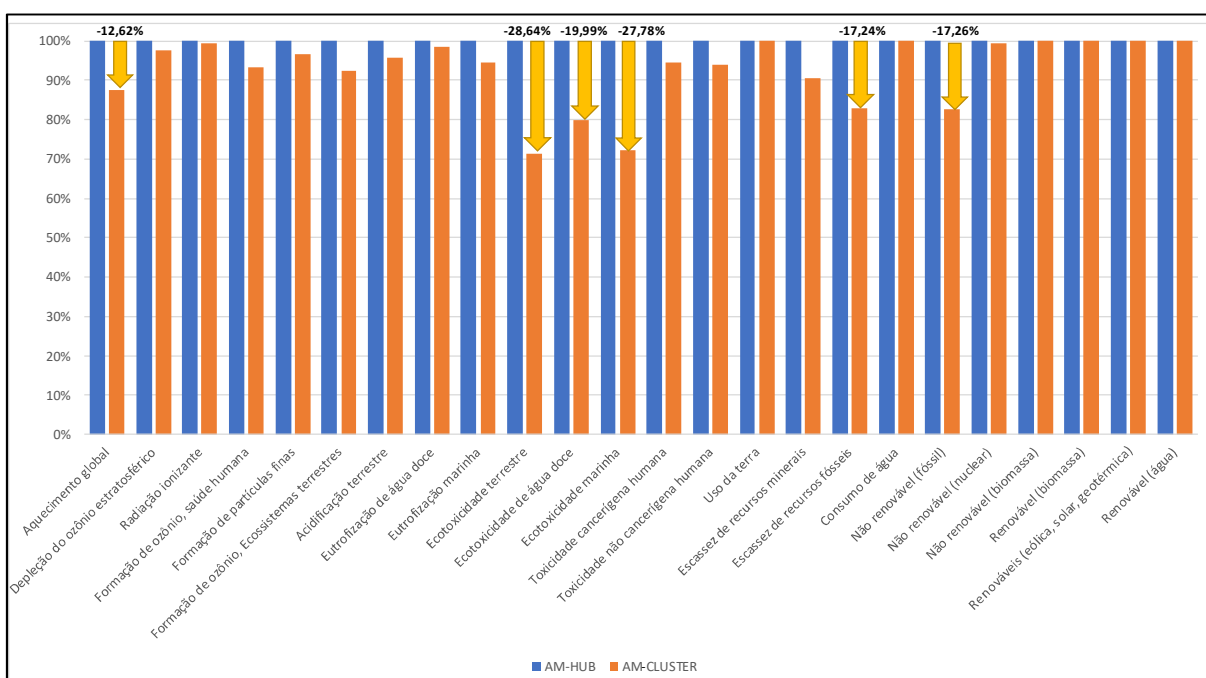


Figura 5.23 – Comparação do LCIA das configurações AM-HUB e AM-CLUSTER

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

Na Figura 5.24 são apresentadas, para algumas categorias, as reduções percentuais da contribuição da distribuição de produtos no impacto total quando há mudança de configuração para o AM-CLUSTER. Das 24 categorias analisadas (18 do Recipiente e 6 do CED), 16 categorias apresentaram reduções de participação da distribuição no impacto ambiental total.

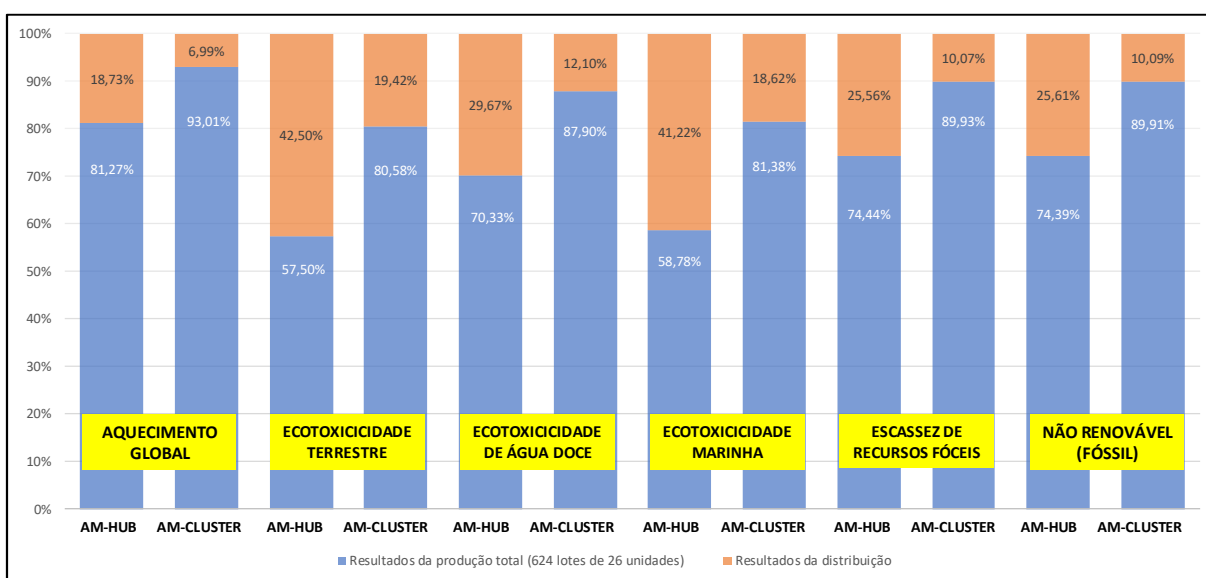


Figura 5.24 – Contribuição do impacto ambiental da distribuição e da produção nas configurações

Fonte: Elaborada pelo autor com resultados gerados no *software* SimaPro (2024)

As reduções obtidas confirmam a expectativa de redução do impacto ambiental quando se organiza a logística entre produtor e demandante com foco na redução da distância para transporte. A implementação da tecnologia aditiva próxima do ponto de uso do item (demandante) reduziu as emissões relacionadas ao transporte na distribuição dos itens e o impacto ambiental do sistema analisado, conforme indicado nos estudos de: Mourtzis et al. (2013), Kreiger et al. (2014), Cerdas et al. (2017a), Peng et al. (2018), Zanoni et al. (2019), Den Boer et al. (2020) e Chadha et al. (2022).

Os resultados obtidos no estudo realizado também vão ao encontro das conclusões de Kreiger et al. (2014) e Kerdlap et al. (2022) sobre as condições de maior benefício na organização de manufaturas distribuídas. Os autores afirmam que sistemas de produção centralizados, com alta contribuição do transporte no impacto ambiental total, quando reorganizados em sistemas que representam manufatura distribuída (como os *clusters*) geram reduções de impacto ambiental.

Com a reorganização logística e redução da contribuição da distribuição nos impactos ambientais (Figura 5.24), o foco de estudos futuros sobre o sistema analisado pode ser no detalhamento e em melhorias nas operações de produção com AM, discutida na seção 5.3.2.1, que destacou a impressão de peças como a operação que tem maior impacto ambiental devido ao consumo de energia. Kerdlap et al. (2022) destacam a importância de avaliar a utilização de tecnologias de produção com maior eficiência energética e de recursos em manufatura distribuída, em comparação com a produção centralizada, e de avaliar modos de transporte energeticamente eficientes.

Em relação aos modos de transporte, a delimitação de uso do inventário '*Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 {GLO}*' | *market for transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4* | *Cut-off, U*' deve ser analisada criticamente para generalizações dos resultados, pois mudanças do tipo de veículo e da carga transportada podem impactar nos resultados. Em cenários com uso de veículos de carga, a tecnologia pode afetar o consumo de combustível e as emissões de gases do efeito estufa, bem como a capacidade de carga do veículo pode afetar o número de entregas/viagens. Esse é um tema que pode ser explorado em estudos futuros, juntamente com a avaliação de outras organizações de *clusters* para o sistema analisado no presente estudo.

5.4 Integração dos módulos DES e LCA

Nesta etapa do método proposto foi realizada a integração dos módulos DES e LCA. A integração seguiu os seguintes passos: (i) modelagem das variáveis de entrada e saída no modelo DES-LCA, (ii) simulação e análise de resultados para a etapa de produção, e (iii) simulação e análise de resultados para a etapa de distribuição. Os resultados de impacto ambiental são apresentados separadamente para as etapas de produção e de transporte, seguindo a lógica apresentada na LCIA (seção 5.3.2).

5.4.1 Modelagem das variáveis de entrada e saída no modelo DES-LCA

Na seção 5.1.5 foram delimitadas as categorias de impacto de interesse do presente estudo de integração DES-LCA: 'Potencial de Aquecimento Global' (GWP) e 'Demanda de Energia Acumulada' (CED). Desta forma, foram selecionados os resultados da categoria 'Aquecimento Global', gerados no método Recipe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H, e os resultados de todas as categorias do método CED V1.11. Como o método CED V1.11 gera resultados com a mesma unidade (MJ) para todas as categorias de impacto, os resultados foram agregados para utilização do resultado total de CED (soma de todas as categorias).

Também foram considerados os indicadores definidos na seção 5.1.5 para implementação no modelo computacional DES-LCA:

- Emissões de CO₂ na produção, em kg CO₂ eq;
- Emissão de CO₂ no transporte, em kg CO₂ eq;
- Geração de Resíduos Sólidos, em kg ou g;
- Consumo de materiais, em kg ou m³;
- Consumo de energia, em kWh;
- Quantidade produzida (tamanho do lote), em unidades;
- Quantidade de não conformes, em unidades;
- Tempo de produção, em minutos ou horas; e
- Tempo de transporte, em minutos ou horas.

Os parâmetros de entrada para os cálculos dos indicadores de 'Resíduos sólidos', 'Consumo de materiais', 'Quantidade produzida' e 'Quantidade de não

conformes' foram mantidos constantes neste estudo, em função da falta de informações sobre variabilidade desses parâmetros. Foi considerado que isso não afetaria nos resultados das categorias de impacto selecionadas, pois no modelo desenvolvido as categorias são impactadas somente pelos tempos de produção e de transporte. Estudos futuros podem abordar a ampliação de parâmetros operacionais variáveis, mas isso deve ser feito com uma revisão da etapa e dos resultados de LCA para viabilizar a obtenção de informações sobre o impacto da variação desses indicadores no desempenho ambiental representado pelas categorias de impacto.

Os parâmetros de tempo de produção e de transporte são as variáveis de entrada principais do modelo. A variação dessas variáveis afeta as emissões de CO₂ e o consumo de energia e, conseqüentemente, as categorias de impacto que representam o desempenho ambiental do sistema.

Para a etapa de produção foi considerada a relação de variação do tempo com o consumo de energia, resultante das medições discriminadas na seção 5.2.1.2. Para incorporar a variabilidade no indicador de emissões de CO₂ e nas categorias de impacto 'Aquecimento global' e CED para a etapa de produção, foram utilizados os resultados das análises de sensibilidade para o modelo AM-HUB, apresentadas na seção 5.3.2.2. As equações foram obtidas com ajustes de modelos de regressão linear aos dados gerados nas análises de sensibilidade. Como na LCA não são consideradas variáveis de tempo, a análise de sensibilidade da variação do consumo de energia foi utilizada para modelar a variação na emissão de CO₂ e nos impactos das categorias "Aquecimento Global" e na soma das categorias do método CED. As equações obtidas são apresentadas no Quadro 5.9.

Para a etapa de transporte o desempenho ambiental obtido com o módulo LCA é baseado na distância de transporte, que foi usada como variável independente na modelagem de equações de variação das categorias de impacto. A modelagem foi realizada a partir dos resultados da LCIA para a distribuição na configuração AM-HUB (APÊNDICE T). Como as equações (Quadro 5.9) estão em função da distância e o fator de variabilidade é o tempo de transporte, foi realizado um ajuste nas equações considerando a variabilidade de tempo de transporte (distribuições de probabilidades apresentadas no APÊNDICE E) e velocidades médias. A partir dos parâmetros apresentados no APÊNDICE C, foi definida uma velocidade média para entregas até 30 km (35 km/h) e outra para entregas acima de 30 km (65 km/h). As equações

ajustadas são apresentadas no Quadro 5.10. A utilização de dados com variabilidade temporal permitiu a geração de resultados dinâmicos de impactos ambientais.

Quadro 5.9 – Equações para modelagem da variabilidade dos resultados no DES-LCA

VARIÁVEIS DE ENTRADA	EQUAÇÃO	VARIÁVEIS DE SAÍDA (INDICADORES)
CE = Consumo de energia na impressão de peças (MJ)	$CO_2 = (0,000165 * CE) + 0,0615$	CO ₂ = Emissões de CO ₂ na impressão de peças (kg CO ₂ eq)
	$GW = (0,0003 * CE) + 0,1128$	GW = Aquecimento global (<i>Global warming</i>)
	$CED\ total = (0,01095 * CE) + 2,0788$	CED total = soma de todas as categorias do método CED
D = distância de transporte (km)	$CO_2 = (0,2031 * D) + [0,8885 * (7 * 10^{-9})]$	CO ₂ = Emissões de CO ₂ no transporte (kg CO ₂ eq)
	$GW = (0,2286 * D) + (7 * 10^{-9})$	GW = Aquecimento global (<i>Global warming</i>)
	$CED\ total = (2,983 * D) - 0,0044$	CED total = soma de todas as categorias do método CED

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quadro 5.10 – Equações ajustadas para modelagem dos resultados de transporte no DES-LCA

VARIÁVEIS DE ENTRADA	EQUAÇÃO	VARIÁVEIS DE SAÍDA (INDICADORES)
T1 = tempo de transporte até 30 km (min)	$CO_2 = [0,2031 * (35/60) * T1] + [0,8885 * (7 * 10^{-9})]$	CO ₂ = Emissões de CO ₂ no transporte (kg CO ₂ eq)
	$GW = [(0,2286 * (35/60) * T1) + (7 * 10^{-9})]$	GW = Aquecimento global (<i>Global warming</i>)
	$CED\ total = [2,983 * (35/60) * T1] - 0,0044$	CED total = soma de todas as categorias do método CED
T2 = tempo de transporte acima de 30 km (min)	$CO_2 = [0,2031 * (65/60) * T2] + [0,8885 * (7 * 10^{-9})]$	CO ₂ = Emissões de CO ₂ no transporte (kg CO ₂ eq)
	$GW = [(0,2286 * (65/60) * T2) + (7 * 10^{-9})]$	GW = Aquecimento global (<i>Global warming</i>)
	$CED\ total = [2,983 * (65/60) * T2] - 0,0044$	CED total = soma de todas as categorias do método CED
T1 = tempo de transporte até 30 km (min) – representado por uma distribuição de probabilidade <i>Beta</i> (APÊNDICE E) - Notação do ProModel: B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6)		
T2 = tempo de transporte acima de 30 km (min) – representado por uma distribuição de probabilidade <i>Beta</i> (APÊNDICE E) - Notação do ProModel: B(1.37, 0.982, 34.1, 320)		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A programação do modelo integrado DES-LCA, para as operações de produção, foi realizada com base no modelo desenvolvido e discriminado na seção 5.2.3, com a inclusão da programação para obtenção de resultados de desempenho ambiental representado pelas variáveis: 'Aquecimento global', 'CED', 'Consumo total de energia' e 'Total de emissões de CO₂'. Para a geração dos resultados foram programadas variáveis de resultados parciais:

- Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 1;
- Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 2;
- Consumo total de energia na impressão;
- Consumo total de energia no corte;
- Emissões de CO₂ da impressão de peças do Tipo 1;
- Emissões de CO₂ da impressão de peças do Tipo 2;
- Emissões de CO₂ do corte;
- Emissões de CO₂ da distribuição (por transporte);
- CED da distribuição (por transporte); e
- Aquecimento global da distribuição (por transporte).

As variáveis mais relevantes para a análise de desempenho ambiental da etapa de distribuição são apresentadas no Quadro 5.11.

Quadro 5.11 – Variáveis de entrada e saída do modelo DES-LCA – etapa distribuição

VARIÁVEIS DE ENTRADA	VARIÁVEIS DE SAÍDA (INDICADORES)
Tempo de transporte – demandante localizado a uma distância de até 30 km (min)	Emissões de CO ₂ por transporte (kg CO ₂ eq)
	Aquecimento global por transporte (kg CO ₂ eq)
	CED por transporte (MJ)
Tempo de transporte – demandante localizado a uma distância acima de 30 km (min)	Emissões de CO ₂ por transporte (kg CO ₂ eq)
	Aquecimento global por transporte (kg CO ₂ eq)
	CED por transporte (MJ)
Emissões de CO ₂ por transporte (kg CO ₂ eq)	TOTAL DE EMISSÕES DE CO₂ – DISTRIBUIÇÃO (kg CO₂ eq)
Aquecimento global por transporte (kg CO ₂ eq)	AQUECIMENTO GLOBAL – DISTRIBUIÇÃO (kg CO₂ eq)
CED por transporte (MJ)	CED TOTAL – DISTRIBUIÇÃO (MJ)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A relação entre as variáveis de entrada e saída mais relevantes para a análise de desempenho ambiental da etapa de produção do sistema analisado são discriminadas no Quadro 5.12. Outras variáveis programadas para apoiar a execução da simulação foram suprimidas, mas estão detalhadas na programação do modelo disponível no APÊNDICE U. A representação visual do modelo computacional DES-LCA para a configuração AM-HUB é apresentada no APÊNDICE V.

Quadro 5.12 – Variáveis de entrada e saída do modelo DES-LCA – etapa produção

VARIÁVEIS DE ENTRADA	VARIÁVEIS DE SAÍDA (INDICADORES)
Tempo de impressão de peças do Tipo 1 (min)	Emissões de CO ₂ na impressão de peças do Tipo 1 (kg CO ₂ eq)
	Consumo de energia na impressão de peças do Tipo 1 (MJ)
Tempo de impressão de peças do Tipo 2 (min)	Emissões de CO ₂ na impressão de peças do Tipo 2 (kg CO ₂ eq)
	Consumo de energia na impressão de peças do Tipo 2 (MJ)
Tempo de corte (min)	Consumo de energia no corte (MJ)
Consumo de energia no corte (MJ)	Consumo total de energia no corte (MJ)
Emissões de CO ₂ na impressão de peças do Tipo 1 (kg CO ₂ eq)	TOTAL DE EMISSÕES DE CO₂ – PRODUÇÃO (kg CO₂ eq)
Emissões de CO ₂ na impressão de peças do Tipo 2 (kg CO ₂ eq)	
Emissões de CO ₂ no corte (kg CO ₂ eq)	
Consumo de energia na impressão de peças do Tipo 1 (MJ)	Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 1 (MJ)
Consumo de energia na impressão de peças do Tipo 2 (MJ)	Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 2 (MJ)
Consumo total de energia no corte (MJ)	CONSUMO TOTAL DE ENERGIA - PRODUÇÃO (MJ)
Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 1 (MJ)	
Consumo total de energia na impressão de peças do Tipo 2 (MJ)	
Consumo total de energia (MJ)	AQUECIMENTO GLOBAL – PRODUÇÃO (kg CO₂ eq)
	CED TOTAL – PRODUÇÃO (MJ)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5.4.2 Simulação e análise de resultados para a etapa de produção

Para avaliar o impacto da variabilidade do tempo das operações de manufatura nos resultados foram executadas 10 replicações da simulação da produção da demanda total de *face shields*. Analisando os resultados, detalhados na Tabela 5.22, não foi identificada nenhuma variabilidade para dois parâmetros de desempenho ambiental ('Aquecimento global' e 'Total de emissões de CO₂') e uma variabilidade não significativa nos resultados finais de desempenho ambiental dos outros dois parâmetros ('CED total' e 'Consumo total de energia'). O comportamento de pouca ou nenhuma variação resulta da pouca variabilidade do consumo de energia/tempo nas operações de manufatura.

Tabela 5.22 – Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de produção

Variável de saída	Replicação	Resultado do modelo com dados originais	Varição absoluta entre o menor e maior resultado	Varição percentual da diferença do menor e maior resultado
CONSUMO ENERGIA TOTAL (kWh)	1	6854,33	15	0,22%
	2	6862,88		
	3	6850,06		
	4	6862,23		
	5	6849,79		
	6	6852,46		
	7	6856,76		
	8	6851,78		
	9	6847,88		
	10	6852,7		
AQUECIMENTO GLOBAL TOTAL - PRODUÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	2,17	0	0,00%
	2	2,17		
	3	2,17		
	4	2,17		
	5	2,17		
	6	2,17		
	7	2,17		
	8	2,17		
	9	2,17		
	10	2,17		
CED TOTAL - PRODUÇÃO (MJ)	1	77,13	0,17	0,22%
	2	77,23		
	3	77,09		
	4	77,22		
	5	77,08		
	6	77,11		
	7	77,16		
	8	77,11		
	9	77,06		
	10	77,12		
TOTAL DE EMISSÕES DE CO ₂ - PRODUÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	1,13	0	0,00%
	2	1,13		
	3	1,13		
	4	1,13		
	5	1,13		
	6	1,13		
	7	1,13		
	8	1,13		
	9	1,13		
	10	1,13		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos motivaram a realização de uma análise de sensibilidade nos limites inferior e superior da distribuição de probabilidade do tempo de impressão de peças do Tipo 1. Essa operação foi selecionada por ter um impacto maior no consumo de energia e, conseqüentemente, no desempenho ambiental (seção 5.3.2.1). O limite inferior foi reduzido em 50% do seu valor e o limite superior foi aumentado em 50%, gerando valores para a análise somente do impacto da variação. Os valores de produção e de consumo de energia gerados com a mudança não representam o processo real e não devem ser utilizados para inferências de mudanças no sistema analisado.

Com a variação realizada foram obtidos resultados com diferenças maiores entre as replicações realizadas. Na Tabela 5.23 são apresentados os resultados das 10 replicações para o modelo DES-LCA com os dados originais e para o modelo com ajuste na variabilidade da distribuição de probabilidade do tempo de impressão de peças do Tipo 1. Os resultados indicam que mesmo com uma variação percentual significativa no tempo da impressora a variação nos resultados de desempenho ambiental não são significativos, com a variação entre valores limites (superior e inferior) dos resultados ficando abaixo de 2%.

Tabela 5.23 – Resultados da análise de sensibilidade para 10 replicações do modelo DES-LCA

Variável de saída	Replicação	Resultado do modelo com dados originais	Varição absoluta entre o menor e maior resultado	Varição percentual da diferença do menor e maior resultado	Resultado com variação nos limites da variável tempo	Varição absoluta entre o menor e maior resultado	Varição percentual da diferença do menor e maior resultado
CONSUMO ENERGIA TOTAL (kWh)	1	6.854,33	15	0,22%	6.180,13	88,17	1,42%
	2	6.862,88			6.219,85		
	3	6.850,06			6.131,68		
	4	6.862,23			6.202,25		
	5	6.849,79			6.150,82		
	6	6.852,46			6.152,60		
	7	6.856,76			6.185,13		
	8	6.851,78			6.165,20		
	9	6.847,88			6.141,17		
	10	6.852,70			6.154,12		
AQUECIMENTO GLOBAL TOTAL - PRODUÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	2,17	0	0,00%	1,97	0,03	1,52%
	2	2,17			1,98		
	3	2,17			1,95		
	4	2,17			1,97		
	5	2,17			1,96		
	6	2,17			1,96		
	7	2,17			1,97		
	8	2,17			1,96		
	9	2,17			1,96		
	10	2,17			1,96		
CED TOTAL - PRODUÇÃO (MJ)	1	77,13	0,17	0,22%	69,75	0,97	1,38%
	2	77,23			70,19		
	3	77,09			69,22		
	4	77,22			69,99		
	5	77,08			69,43		
	6	77,11			69,45		
	7	77,16			69,81		
	8	77,11			69,59		
	9	77,06			69,32		
	10	77,12			69,47		
TOTAL DE EMISSÕES DE CO ₂ - PRODUÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	1,13	0	0,00%	1,02	0,02	1,94%
	2	1,13			1,03		
	3	1,13			1,01		
	4	1,13			1,02		
	5	1,13			1,01		
	6	1,13			1,01		
	7	1,13			1,02		
	8	1,13			1,02		
	9	1,13			1,01		
	10	1,13			1,02		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5.4.3 Simulação e análise de resultados para a etapa de distribuição

Para avaliar o impacto da variabilidade do tempo de transporte nos resultados, também foram executadas 10 replicações da simulação do total de entregas realizadas. Os tempos de entrega utilizados para definição das distribuições de probabilidade na simulação estão disponíveis no APÊNDICE D.

Os resultados obtidos para o AM-HUB, detalhados na Tabela 5.24, indicam uma variação significativa entre o maior e o menor valor obtido nas replicações realizadas. O comportamento de variação resulta do impacto do transporte no desempenho ambiental do sistema analisado. A variabilidade do tempo de entrega, em 10 replicações de simulações das 77 entregas realizadas no sistema estudado, resultou em variações acima de 25% para as variáveis de desempenho ambiental consideradas.

Tabela 5.24 – Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de distribuição AM-HUB

Variável de saída	Replicação	Resultado do modelo com dados originais	Varição absoluta entre o menor e maior resultado	Varição percentual da diferença do menor e maior resultado
AQUECIMENTO GLOBAL TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	456,3	122,06	25,44%
	2	449,99		
	3	416,07		
	4	357,67		
	5	444,63		
	6	475,89		
	7	479,73		
	8	402,76		
	9	477,44		
	10	449,15		
CED TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (MJ)	1	5.514,82	2.092,37	30,82%
	2	5.379,78		
	3	5.296,66		
	4	4.825,11		
	5	4.696,60		
	6	6.689,85		
	7	5.825,73		
	8	5.056,93		
	9	6.032,25		
	10	6.788,97		
TOTAL DE EMISSÕES DE CO ₂ - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	373,13	118,83	28,45%
	2	369,67		
	3	389,12		
	4	298,89		
	5	341,01		
	6	400,77		
	7	363,18		
	8	349,29		
	9	393,55		
	10	417,72		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para esta etapa de distribuição também foram testados valores de tempo de transporte para a configuração AM-CLUSTER. No APÊNDICE W são discriminados os dados e as distribuições de probabilidade testadas, sendo que a distribuição de probabilidade Gamma foi definida para utilização na simulação. Os valores de tempos da amostra foram calculados a partir das distâncias de entrega entre centros de serviços dos *clusters* e os demandantes, considerando uma velocidade média de 35 km/h.

Na Tabela 5.25 são apresentados os resultados de 10 replicações e as variações entre o menor e maior resultado de cada categoria de impacto analisada. Os dados das Tabelas 5.24 e 5.25 corroboram a ideia de que o efeito da variabilidade em parâmetros operacionais de um sistema de produção e distribuição influencia nos resultados de desempenho operacional, o que exige atenção na utilização de resultados determinísticos para avaliar impactos ambientais. Avaliando os resultados das Tabelas citadas, a variação dos resultados das variáveis de desempenho ambiental ficou entre 23,79 e 30,82%.

Tabela 5.25 – Resultados de 10 replicações do modelo DES-LCA – etapa de distribuição AM-CLUSTER

Variável de saída	Replicação	Resultado distribuição - AM-CLUSTER	Varição absoluta entre o menor e maior resultado	Varição percentual da diferença do menor e maior resultado
AQUECIMENTO GLOBAL TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	102,09	33,60	25,84%
	2	99,27		
	3	130,02		
	4	96,42		
	5	114,89		
	6	105,47		
	7	118,01		
	8	106,02		
	9	108,29		
	10	104,09		
CED TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (MJ)	1	1.431,15	510,91	29,87%
	2	1.470,23		
	3	1.199,50		
	4	1.531,51		
	5	1.393,28		
	6	1.710,41		
	7	1.431,46		
	8	1.243,33		
	9	1.326,43		
	10	1.360,56		
TOTAL DE EMISSÕES DE CO ₂ - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	89,14	26,69	23,79%
	2	94,22		
	3	94,94		
	4	91,82		
	5	85,52		
	6	88,11		
	7	112,21		
	8	96,02		
	9	96,74		
	10	104,52		

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Tabela 5.26 são apresentados os dados de redução de impacto ambiental com a mudança de configuração do AM-HUB para o AM-CLUSTER. Os resultados de reduções no ‘Aquecimento global’, ‘CED total’ e ‘Total de emissões de CO₂’ replicam os resultados do módulo LCA (seção 5.3.2), mas a redução percentual obtida com o modelo DES-LCA (entre 74,05 e 75,26%) foi maior do que a do modelo LCA (67,4% - seção 5.3.2.2). A diferença pode ser devida à variabilidade incorporada no modelo DES, o que demanda análises futuras da distribuição de probabilidade utilizada para o tempo de transporte.

Tabela 5.26 – Comparação dos resultados do AM-HUB e AM-CLUSTER – etapa de distribuição

Variável de saída	Replicação	Resultado distribuição - AM-HUB	Resultado distribuição - AM-CLUSTER	Redução(%)	Redução média (%)
AQUECIMENTO GLOBAL TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	456,30	102,09	77,63%	75,26%
	2	449,99	99,27	77,94%	
	3	416,07	130,02	68,75%	
	4	357,67	96,42	73,04%	
	5	444,63	114,89	74,16%	
	6	475,89	105,47	77,84%	
	7	479,73	118,01	75,40%	
	8	402,76	106,02	73,68%	
	9	477,44	108,29	77,32%	
	10	449,15	104,09	76,83%	
CED TOTAL - DISTRIBUIÇÃO (MJ)	1	5.514,82	1.431,15	74,05%	74,59%
	2	5.379,78	1.470,23	72,67%	
	3	5.296,66	1.199,50	77,35%	
	4	4.825,11	1.531,51	68,26%	
	5	4.696,60	1.393,28	70,33%	
	6	6.689,85	1.710,41	74,43%	
	7	5.825,73	1.431,46	75,43%	
	8	5.056,93	1.243,33	75,41%	
	9	6.032,25	1.326,43	78,01%	
	10	6.788,97	1.360,56	79,96%	
TOTAL DE EMISSÕES DE CO ₂ - DISTRIBUIÇÃO (kg CO ₂ eq)	1	373,13	89,14	76,11%	74,05%
	2	369,67	94,22	74,51%	
	3	389,12	94,94	75,60%	
	4	298,89	91,82	69,28%	
	5	341,01	85,52	74,92%	
	6	400,77	88,11	78,01%	
	7	363,18	112,21	69,10%	
	8	349,29	96,02	72,51%	
	9	393,55	96,74	75,42%	
	10	417,72	104,52	74,98%	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5.4.4 Análise do módulo DES-LCA

O módulo DES-LCA possibilitou a geração de dados de emissões de CO₂, de consumo de energia, de ‘CED’ e ‘Aquecimento global’ em uma linha temporal que reflete a dinâmica do processo aditivo e logístico com base na variabilidade do tempo das operações, do consumo de energia e do tempo de transporte. O modelo DES-

LCA permite a simulação de diferentes configurações baseadas nas mudanças desses 3 parâmetros operacionais: tempo das operações, consumo de energia e tempo de transporte.

Apesar da variabilidade dos resultados de desempenho ambiental relacionado à etapa de produção não serem significativos, mesmo com variações de 50% no valor de parâmetros operacionais de entrada do AM-HUB, o modelo desenvolvido permitiu demonstrar como o relacionamento entre a configuração de um sistema de produção e o desempenho ambiental pode ser quantificado a partir de dados e resultados obtidos com a aplicação da LCA. Em relação à etapa de distribuição, os efeitos de variabilidade de tempo de transporte foram evidentes nas variáveis de desempenho ambiental.

A configuração descentralizada (AM-CLUSTER) apresentou resultados positivos em relação ao desempenho ambiental quando comparada com a configuração centralizada (AM-HUB). Os resultados positivos obtidos com o modelo (redução do impacto ambiental) não permitem que sejam feitas generalizações para a aplicação do modelo DES-LCA, pois o modelo foi testado somente para um sistema real específico. Dependendo da configuração de atendimento e da escala e produção, os resultados de desempenho ambiental podem piorar em relação à configuração centralizada.

O modelo computacional desenvolvido também permite análises relacionadas a mudanças de demanda e melhorias de eficiências nas operações e transportes. Desta forma, a aplicação do modelo DES-LCA em outros estudos sobre descentralização de produção, variando os parâmetros demanda e distância de transporte/entrega em diversos cenários, poderá gerar informações para conclusões mais consistentes e generalizações sobre os benefícios ambientais da descentralização com base nos resultados do modelo DES-LCA.

5.5 Avaliação do método proposto

O objetivo do estudo de desempenho ambiental foi a caracterização e quantificação do comportamento de um sistema produtivo com AM em duas configurações de fluxos de materiais: (i) uma com a centralização da produção (AM-HUB) e (ii) outra com a descentralização da fabricação do produto (AM-CLUSTER). O método proposto (Figura 4.2) foi avaliado para cada etapa realizada.

Em relação à etapa 'Definição dos objetivos e escopo' considera-se que foram realizados todos os procedimentos necessários em relação ao entendimento do funcionamento do sistema produtivo e de distribuição. O levantamento de dados e informações foi amplo, mas em alguns casos foram feitas considerações subjetivas para suprir a falta de dados/informações em registros formais. Além disso, uma complementação de dados de operações e de materiais secundários poderia ser realizada para a análise dentro dos limites do processo considerado.

Entende-se também que a definição do sistema de produto, unidade funcional, fluxo de referência, categorias de impacto e indicadores atenderam o objetivo do estudo em relação à amplitude, pois todas as etapas foram realizadas. A definição de indicadores e categorias de impacto para análise pode ser revista em estudos futuros, incorporando outros métodos de LCIA para geração de dados e informações para categorias de impacto não consideradas no presente estudo.

O 'Módulo DES' foi implementado atendendo todas as etapas obrigatórias, segundo a literatura especializada, bem como gerando resultados validados e que representam o sistema estudado. O modelo de simulação desenvolvido representa o comportamento real do sistema de forma mais precisa do que com o uso de modelos que usam valores constantes nas variáveis de entrada. Um ponto de revisão para estudos futuros é a coleta de dados primários mais detalhados como, por exemplo, o consumo de energia nas diferentes fases de operação de uma máquina ou equipamento. O detalhamento só deve ser feito se o objetivo do estudo futuro demandar, pois a modelagem computacional utiliza simplificações para redução no tempo de programação.

Como o modelo computacional foi validado e representa o sistema estudado, isso permite testar diversos cenários de funcionamento do comportamento estocástico do sistema. A avaliação de outras organizações de *clusters* para o sistema analisado deve ser ampliada em estudos futuros, gerando informações sobre a sensibilidade do sistema em função da localização do ponto de produção (centro de serviço) e da logística de entrega (rotas e veículos utilizados).

No 'Módulo LCA' se trabalhou com uma análise do portão ao portão, o que pode ser ampliado em estudos futuros, para incorporar as etapas a montante e a jusante do processo aditivo. A utilização de dados primários (coletados ou estimados) e secundários (inventário do Ecoinvent 3.9.1 e da literatura) foi realizada de forma transparente, mas dados de produção e uso de materiais indiretos, bens de capital e

tratamento de resíduos foram desconsiderados, o que gera limitações para tomadas de decisão baseadas nos resultados da LCA.

A partir da análise da qualidade dos dados na etapa de LCI (dados primários e secundários), identificou-se a necessidade de melhorias na consistência do estudo na etapa de LCA. Melhorias na cobertura temporal, geográfica e tecnológica dos dados e na ampliação de medições para utilização de dados primários devem ser realizadas para o aumento da qualidade dos dados utilizados.

Neste estudo não foi priorizada a geração de dados nacionais para compor o banco de inventários como, por exemplo, o da SICV Brasil (2023), mas após a finalização do estudo verificou-se que alguns dados podem colaborar na redução da baixa disponibilidade de inventários para o Brasil. Os dados de consumo de energia das impressoras e da máquina de corte podem ser documentados como dados de inventário que refletem os aspectos reais de uma atividade econômica local.

Um ponto crítico na aplicação da LCA são as incertezas nos resultados gerados nas categorias de impacto, o que demandará, em estudos futuros, a incorporação e/ou revisão de variabilidade em dados primários e secundários para aumentar a precisão dos resultados. Os resultados também são afetados pela modelagem realizada no *software* SimaPro, o que orienta a revisão do detalhamento das operações de produção do sistema analisado e das alternativas testadas de tecnologias de produção e/ou de distribuição.

No 'módulo DES-LCA' foram incorporados os indicadores de desempenho ambiental definidos e modelados a partir dos resultados do modelo de LCA. Desta forma, impactos das mudanças de parâmetros de tempo de operações, de consumo de energia e de tempo de transporte puderam ser avaliados em indicadores ambientais de emissões de CO₂, de 'Aquecimento global' e de 'CED' dentro de um modelo DES. O modelo integrado permitiu avaliar as diferentes configurações AM-HUB e AM-CLUSTER, entendendo as interdependências entre as operações de produção e distribuição, bem como a influência de cada elemento operacional e dos processos, recursos e materiais utilizados, no desempenho ambiental e operacional delimitado.

Estudos futuros podem abordar a ampliação de parâmetros operacionais variáveis, mas isso deve ser feito com uma revisão da etapa e dos resultados de LCA. A etapa de LCA é fundamental na obtenção de informações de desempenho ambiental que permitam relacionar o impacto da variação de parâmetros operacionais

e logísticos com os resultados de desempenho ambiental, representado pelas categorias de impacto. Os resultados da etapa de LCA são baseados em processos estacionários e lineares, mas permitem o levantamento de informações para modelagem das relações entre variáveis de entrada e saída, e que podem ser programadas no modelo DES para capturar um comportamento estocástico.

Os resultados obtidos com as simulações do modelo DES-LCA possibilitaram atender o objetivo de comparação dos resultados de desempenho ambiental das diferentes configurações AM-HUB e AM-CLUSTER, com base no funcionamento dinâmico do sistema. Além disso, o estudo permitiu a coleta de dados para estruturação do inventário (etapa de LCI) e a identificação dos elementos necessários para a modelagem do sistema em um *software* de DES e em um *software* de LCA.

O modelo DES-LCA foi desenvolvido para o escopo do presente estudo: um cenário de comparação de produção centralizada e descentralizada com AM, com demandas, localizações de entregas e processo de manufatura pré-definidos. Sendo assim, os modelos DES, LCA e DES-LCA são customizados para o estudo de caso, não podendo ser aplicados em outros estudos sem a realização de ajustes.

Aplicações futuras dos modelos em outros sistemas produtivos permitirão avaliar possíveis generalizações sobre a aplicação do método proposto e dos modelos desenvolvidos. A simulação computacional com o modelo DES-LCA apresentado nesta Tese poderá, por exemplo, ser usada como referência em estudos para complementar as informações/dados para o processo de tomada de decisão sobre configurações de produção centralizada ou descentralizada. Além disso, a estratégia utilizada na presente tese pode ser utilizada como um *framework* para orientar trabalhos futuros que visam o desenvolvimento e validação de modelos DES-LCA.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa buscou uma forma de combinar DES e LCA para permitir uma avaliação mais ampla do desempenho ambiental de um sistema produtivo e de mudanças na sua configuração. O modelo DES-LCA desenvolvido e proposto como produto final de Tese e a execução das etapas do método de implementação do modelo permitiram definir uma forma de integração que resultou em informações relevantes para o objetivo da pesquisa.

O objetivo geral e os objetivos específicos foram atendidos, bem como a questão de pesquisa foi respondida com o detalhamento da integração do modelo DES-LCA e avaliação do método proposto (Capítulo 5). O estudo desenvolvido permitiu avaliar a proposta de integração de diferentes sistemáticas (DES e LCA) para apoiar estudos de impacto ambiental de sistemas produtivos e logísticos, bem como quantificar o desempenho ambiental e identificar oportunidades de melhoria no escopo de ciclo de vida considerado para o produto analisado.

A análise do método proposto permite afirmar que o modelo integrado pode ser mais adequado para apoiar tomadas de decisões do que os modelos DES e LCA utilizados de forma não integrada. Um estudo de caso foi utilizado para validar as etapas do método proposto: a avaliação do desempenho do processo produtivo de produção/montagem de *face shields* e da logística de distribuição do produto.

A aplicação do método proposto no caso de produção de *face shields* gerou informações para avaliação do potencial de uso dos modelos DES, LCA e DES-LCA na avaliação de configurações de produção centralizada e descentralizada com AM. Generalizações não podem ser realizadas pelo fato deste estudo ficar limitado ao desempenho ambiental de um sistema específico. O modelo deve ser aplicado em outros cenários e sistemas de produção para avaliação de necessidade de ajustes

e/ou identificação do potencial de generalização do modelo. Os indicadores operacionais e ambientais utilizados no modelo podem ser complementados para análises mais amplas e com foco em perspectivas que não foram aprofundadas ou abordadas no trabalho.

A partir da análise dos resultados obtidos nos módulos DES, LCA e DES-LCA, afirma-se que o método proposto pode disponibilizar dados e informações para estudos futuros que visem maximizar a eficiência de configurações de produção centralizada e descentralizada com AM em termos de consumo de energia e de emissões de CO₂. Além disso, a simulação como base do modelo DES-LCA permite que o mesmo seja utilizado como um modelo preditivo de impacto ambiental para avaliar *trade-offs* de uso das diferentes configurações e a sensibilidade dos resultados em relação a mudanças em parâmetros críticos.

A avaliação crítica das etapas de desenvolvimento e implementação do modelo DES-LCA, proposto nesta Tese, permite afirmar que as etapas são aplicáveis em qualquer projeto que tenha como objetivo, ou utilize como apoio, a integração dos métodos de simulação com DES e de avaliação de ciclo de vida com LCA. O método proposto orienta como estruturar dados e informações para capturar o comportamento dinâmico do sistema analisado, bem como explica como gerar e analisar os resultados de simulações de cenários alternativos para comparação de desempenho ambiental. Dessa forma, pode ser utilizado como um *framework* para orientar trabalhos futuros que visam o desenvolvimento e validação de modelos DES-LCA.

Uma das contribuições do estudo é a avaliação operacional e ambiental de um processo aditivo real ainda não analisado na literatura. Pesquisas que abordam análise de inventário do ciclo de vida no contexto brasileiro contribuem para a criação de dados nacionais e a caracterização de atividades locais. No estudo foram identificados parâmetros operacionais, dados, informações e resultados que permitiram a caracterização de atividades que poderão ficar como referências para estudos futuros de sistemas semelhantes e para estruturas de redes de produção e distribuição com AM.

O modelo DES-LCA também pode contribuir para estudos de virtualização de Sistemas de Produção e Cadeias de Suprimentos com AM. A simulação computacional e a LCA exigem a digitalização do processo de gestão do ciclo de vida do produto, o que pode gerar dados e informações para estudos que utilizem a digitalização de processos aditivos em suas etapas. Outra oportunidade futura é a

conexão do modelo DES-LCA com dados reais provenientes de um sistema físico, possibilitando a atualização em tempo real e o acompanhamento do desempenho ambiental na linha do tempo do funcionamento do sistema analisado.

A integração com estudos que abordam o desenvolvimento de plataformas de IoT (*Internet of Things*) para produzir e entregar demandas personalizadas de forma descentralizada, pode resultar em ganhos em flexibilidade da AM com a rapidez da tomada de decisão na plataforma. A manufatura descentralizada permite melhorar o nível de serviço no atendimento de demandas customizadas. Por exemplo, em Lemos et al. (2020) é apresentado um projeto de desenvolvimento de uma plataforma IoT que permite a gestão e operação de uma rede de células de produção com AM.

Em cenários futuros de ruptura de abastecimento, como uma nova pandemia, pode-se utilizar o modelo DES-LCA integrado com uma plataforma IoT, onde parceiros locais com disponibilidade de processos aditivos podem compartilhar sua capacidade produtiva AM conectando impressoras ao centro de controle das demandas. A logística de produção e de entrega de peças e/ou produtos pode ser controlada em tempo real pelo centro de controle e reorganizada para atender indicadores de desempenho operacional e de desempenho ambiental definidos.

Outra linha de pesquisa que pode se beneficiar do modelo proposto nesta Tese é a de *Green Supply Chain*, que busca a estruturação/organização de Cadeias de Suprimentos sustentáveis. Essa linha de pesquisa já aborda análises sobre a utilização da AM na estruturação de redes de suprimentos com *hubs* centralizados, a descentralização dos processos aditivos e a AM sendo utilizada no local de uso do item produzido (WU et al., 2022).

Estudos de desenvolvimento de modelos de otimização de sistemas com AM também podem se beneficiar do modelo desenvolvido. O modelo DES-LCA pode ser utilizado para testes das configurações ótimas geradas em um ambiente com variabilidade no comportamento dos parâmetros operacionais e ambientais, complementando os resultados e as conclusões geradas com modelos de otimização.

Projetos de estruturação de Cadeias de Suprimentos com AM mais curtas, mais localizadas, responsivas e sustentáveis consideram o impacto da redução de tempo de transporte com a reconfiguração do centro produtivo de AM para uma localização próxima dos clientes, mas impactos sociais de potencialização de fornecedores locais e impactos econômicos de redução de custos de estoque e transporte também devem ser incorporados. Uma lógica de sustentabilidade multidimensional dentro do modelo

DES-LCA, com foco nas questões ambiental, social e econômica, permitiria uma análise integrada dos *trade-offs* entre resultados ambientais, sociais e econômicos, o que pode gerar conclusões diferentes das obtidas no presente estudo para a configuração mais indicada (baseada somente em desempenho ambiental).

A modelagem da relação dos indicadores atuais com potenciais ações de descarbonização das indústrias e processos também poderia ser incorporada no modelo DES-LCA. Desta forma, o modelo poderá ampliar os seus benefícios de aplicação e apoiar agentes públicos e da iniciativa privada no desenvolvimento de projetos e/ou políticas para a adoção da AM ou na avaliação de cenários de produção centralizada e descentralizada.

Os benefícios potenciais de utilização do modelo DES-LCA em outros estudos e os benefícios gerados com os resultados desta pesquisa para atendimento do objetivo da Tese, permitem afirmar que o estudo tem uma contribuição efetiva para as áreas de pesquisa sobre AM, DES e LCA. Ajustes no modelo e no método são necessários, mas não invalidam a conclusão de que modelos integrados geram resultados mais completos e permitem uma visão dinâmica do sistema avaliado em relação ao desempenho ambiental de sistema de produção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR-SAVÉN, R. S. Business process modelling: Review and framework. *International Journal of Production Economics*, v. 90, n. 2, p. 129-149, 2004.

AGRAWAL, R.; VINODH, S. State of art review on sustainable additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. v. 25, n. 6, p. 1045–1060, 2019.

ALI, MD. H.; ABILGAZIYEV, A.; ADAIR, D. 4D printing: a critical review of current developments, and future prospects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, p. 701-717, 2019.

AMERICA MAKES; ANSI AMSC (Additive Manufacturing Standardization Collaborative). Standardization roadmap for additive manufacturing. February, Public Draft, 2017.

AMIN, D.; NGUYEN, N.; ROSER, S. M.; ABRAMOWICZ, S. 3D printing of face shields during COVID-19 pandemic: a technical note. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, v. 78, n. 8, p. 1275-1278, 2020.

ARBABIAN, M. E.; WAGNER, M. R. The impact of 3D printing on manufacturer–retailer supply chains. *European Journal of Operational Research*, v. 285, n. 2, p. 538-552, 2020.

ARRIZUBIETA, J. I.; UKAR, O.; OSTOLAZA, M.; MUGICA, A. Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling. *Metals*, v.10, n. 2, p. 261, 2020.

ASADOLLAHI-YAZDI, E.; GARDAN, J.; LAFON, P. Integrated design for additive manufacturing based on skinskeleton approach. *Procedia CIRP*. v. 60, p. 217-222, 2017.

ASHOURPOUR, M.; ZANONI, S. Additive Manufacturing Impacts on Operations Management. In: *International Conference on Production Research*. 2015.

ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2013. Disponível em: <<http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>> Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

ASTM, D792-13 Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

AVVENTUROSO, G.; FORESTI, R.; SILVESTRI, M.; FRASSON, E. M. Production paradigms for additive manufacturing systems: a simulation-based analysis. International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), Funchal, Portugal, 2017.

AVVENTUROSO, G.; SILVESTRI, M.; FRAZZON, E. M. Additive manufacturing plant for large scale production of medical devices: A simulation study. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1442-1447, 2018.

AZIMI, P.; FAZLI, T.; STEPHENS, B. Predicting concentrations of ultrafine particles and volatile organic compounds resulting from desktop 3D printer operation and the impact of potential control strategies. Journal of Industrial Ecology, v. 21, n. S1, p. S107-S119, 2017.

AZIMI, P.; ZHAO, D.; POUZET, C.; CRAIN, N. E.; STEPHENS, B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. Environmental Science & Technology, v. 50, n. 3, p. 1260-1268, 2016.

BALTA, E. C.; TILBURY, D. M.; BARTON, K. A digital twin framework for performance monitoring and anomaly detection in fused deposition modeling. In: 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, p. 823-829, 2019.

BALTA, E. C.; TILBURY, D. M.; BARTON, K. A centralized framework for system-level control and management of additive manufacturing fleets. In: 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, p. 1071-1078, 2018.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. Discrete-Event System Simulation. 3. Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, Inc. 2001.

BARE, J. C.; GLORIA, T. P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. Journal of Cleaner Production, v. 16, n. 10, p. 1021-1035, 2008.

BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W.; DE HAES, H. A. U. Life cycle impact assessment workshop summary midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 5, n. 6, p. 319-326, 2000.

BAUMERS, M.; DUFLOU, J. R.; FLANAGAN, W.; GUTOWSKI, T. G.; KELLENS, K.; LIFSET, R. Charting the environmental dimensions of additive manufacturing and 3D printing. Journal of Industrial Ecology, v.21, p. S1, 2017.

- BEKKER, A.C.M.; VERLINDEN, J.C. Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *Journal of Cleaner Production*, v.177, p. 438-447, 2018.
- BEN-NER, A.; SIEMSEN, E. Decentralization and localization of production: The organizational and economic consequences of additive manufacturing (3D printing). *California Management Review*, v.59, n. 2, p. 5-23, 2017.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. *Gestão Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.
- BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 83, p. 389-405, 2016.
- BJØRN, A.; OWSIANIAK, M.; LAURENT, A.; OLSEN, S. I.; CORONA, A.; HAUSCHILD, M. Z. Scope definition. Life cycle assessment: Theory and practice, 75-116. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, RALPH K.; OLSEN, STIG I. Life cycle assessment. Springer International Publishing, Cham, 2018a.
- BJØRN, A.; MOLTESEN, A.; LAURENT, A.; OWSIANIAK, M.; CORONA, A.; BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. Life cycle inventory analysis. Life cycle assessment: Theory and practice, 117-165. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, RALPH K.; OLSEN, STIG I. Life cycle assessment. Springer International Publishing, Cham, 2018b.
- BRONDI, C.; CARPANZANO, E. A modular framework for the LCA-based simulation of production systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 4, n. 3, p. 305-312, 2011.
- BRUNDAGE, M. P.; LECHEVALIER, D.; MORRIS, K. C. Toward Standards-Based Generation of Reusable Life Cycle Inventory Data Models for Manufacturing Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, v. 141, n. 2, 2019.
- BUI-DUY, L.; LE, L. T.; VU-THI-MINH, N.; HOANG-HUONG, G.; BUI-THI-THANH, N.; NGUYEN, P. N. Economic and environmental analysis of biomass pellet supply chain using simulation-based approach. *Asia Pacific Management Review*. 2023.
- BURKHART, M.; AURICH, J. C. Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. *Procedia CIRP*, v. 29, p. 408-413, 2015.
- CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, v. 18, n. 4, p.255-258, 2012.

CATALDO, A.; TAISCH, M.; STAHL, B. Modelling, simulation and evaluation of energy consumptions for a manufacturing production line. In: IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, p. 7537-7542, 2013.

CAVALCANTE, I. M.; FRAZZON, E. M.; FORCELLINI, F. A. Cloud-based additive manufacturing as a strategy for product variety: A simulation study. In: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA 2018. Springer International Publishing, p. 53-66, 2019.

CAUCHICK-MIGUEL, P. et al. *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 3 ed., Grupo GEN, 2018.

CERDAS, F.; JURASCHEK, M.; THIEDE, S.; HERRMANN, C. Life cycle assessment of 3D printed products in a distributed manufacturing system. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. S1, p. S80-S93, 2017a.

CERDAS, F.; THIEDE, S.; JURASCHEK, M.; TURETSKY, A.; HERRMANN, C. Shop-floor life cycle assessment. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 393-398, 2017b.

CHADHA, U.; ABROL, A.; VORA, N. P.; TIWARI, A.; SHANKER, S. K.; SELVARAJ, S. K. Performance evaluation of 3D printing technologies: a review, recent advances, current challenges, and future directions. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 7, n. 5, p. 853-886, 2022.

CHAWLA, O.S.; BIHADE, J. P.; MODAK, J. P.; ZAKIYUDDIN, K. S.; SATHISHKUMAR, A. V.; SURESH, A. V.; KRISHNA, M.. Additive manufacturing and its impact on supply chains. *International Journal of Industrial Engineering and Technology*, v. 4, p. 79-82, 2012.

CHEN, J. M. Carbon neutrality: Toward a sustainable future. *The Innovation*, v. 2, n. 3, 2021.

CHEN, D.; HEYER, S.; IBBOTSON, S.; SALONITIS, K.; STEINGRÍMSSON, J.G.; THIEDE, S. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications. *Journal of Cleaner Production*. v. 107, p. 615-625, 2015.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e prática*. 3ª ed. São Paulo: Bravarte, 2010.

CHONG, L.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, S. A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, p. 2281-2300, 2018.

COLORADO, H. A.; MENDOZA, D. E.; LIN, H. T.; GUTIERREZ-VELASQUEZ, E. Additive manufacturing against the Covid-19 pandemic: A technological model for the adaptability and networking. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 16, p. 1150-1164, 2022.

- COLORADO, H. A.; VELÁSQUEZ, E. I. G.; MONTEIRO, S. N. Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 8221-8234, 2020.
- CUI, W.; YANG, Y.; DI, L.; DABABNEH, F. Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure. *Additive Manufacturing*, v.48, 102471, 2021.
- DA SILVA BARROS, K.; ZWOLINSKI, P. Influence of the use/user profile in the LCA of 3D printed product. *Procedia CIRP*, v. 50, p. 318-323, 2016.
- DA SILVA BARROS, K.; ZWOLINSKI, P.; MANSUR, A. I. Where do the environmental impacts of Additive Manufacturing come from? Case study of the use of 3d-printing to print orthotic insoles. In: *12ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2017)*. 2017.
- DALLMANN, T.; FAÇANHA, C. International comparison of Brazilian regulatory standards for light-duty vehicle emissions. White Paper. International Council on Clean Transportation (ICCT): Washington, DC, USA, 2017.
- D'AMATO, D.; DROSTE, N.; WINKLER, K. J.; TOPPINEN, A. Thinking green, circular or bio: Eliciting researchers' perspectives on a sustainable economy with Q method. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 460-476, 2019.
- DE OLIVEIRA, R. L.; FAGUNDES, L. D.; DA SILVA LIMA, R.; MONTAÑO, M. Discrete event simulation to aid decision-making and mitigation in solid waste management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 25, p. 67-85, 2020.
- DEN BOER, J.; LAMBRECHTS, W.; KRIKKE, H. Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*, v. 257, p. 120301, 2020.
- DESPEISSE, M.; YANG, M.; EVANS, S.; FORD, S.; MINSHALL, T. Sustainable value roadmapping framework for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 61, p. 594-599, 2017.
- DETZEL, A.; KRÜGER, M. Life Cycle Assessment of Polylactide (PLA)—A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials. IFEU, Heidelberg, 168, 2006.
- DING, Z.; WEN, X.; CAO, X.; YUAN, H. A GIS and hybrid simulation aided environmental impact assessment of city-scale demolition waste management. *Sustainable Cities and Society*, v. 86, p. 104108, 2022.
- DMUCHOWSKI, P.; DMUCHOWSKI, W.; BACZEWSKA-DĄBROWSKA, A. H.; GWOREK, B. Environmental, social, and governance (ESG) model; impacts and sustainable investment—

Global trends and Poland's perspective. *Journal of Environmental Management*, 329, 117023, 2023.

DOLZAN, N. Tingimento de fibras sintéticas com corantes dispersos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis, 118 p., 2004.

DREYER L. C.; NIEMANN A. L.; HAUSCHILD M. Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 - Does it matter which one you choose?, *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 8, n.4, p. 191-200, 2003.

DUFLOU, J. R.; KELLENS, K.; DEWULF, W. Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 4, n. 2, p. 129-135, 2011.

DUL, S.; FAMBRI, L.; PEGORETTI, A. Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 85, p.181-191, 2016.

DUNAWAY D.; HARSTVEDT J. D.; MA J. A preliminary experimental study of additive manufacturing energy consumption, 2017. In: *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Cleveland, Ohio, USA. V004T05A013, 2017

DUPAIX, R. B.; BOYCE, Mary. C. Finite strain behavior of poly (ethylene terephthalate) (PET) and poly (ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*, v. 46, n. 13, p. 4827-4838, 2005.

EKVALL, T.; AZAPAGIC, A.; FINNVEDEN, G.; RYDBERG, T.; WEIDEMA, B. P.; ZAMAGNI, A. Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, p. 293-296, 2016.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 39, n. 1, p. 79-100, 2016.

EVERITT, Brian S.; LANDAU, Sabine; LEESE, Morven; STAHL, Daniel. *Cluster Analysis*. 5^a ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

EYERS, D. R.; POTTER, A. T. Supply chain simulation with discrete-continuous combined modeling. *Computers in Industry*. v. 92-93, p. 208-218, 2017.

FAKHIMI, M.; MUSTAFEE, N.; STERGILOULAS, L. K. An investigation into modeling and simulation approaches for sustainable operations management. *Simulation*, v. 92, n. 10, p. 907-919, 2016.

FALUDI, J.; BAYLEY, C.; BHOGAL, S.; IRIBARNE, M. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 1, p. 14-33, 2015.

FINNVEDEN, G. On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5, 229-238, 2000.

FORBES, C. S.; EVANS, M. *Statistical Distributions*. 4^a ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v.137, p.1573-1587, 2016.

FREITAS, D.; ALMEIDA, H. A.; BÁRTOLO, H.; BÁRTOLO, P. J. Sustainability in extrusion-based additive manufacturing technologies. *Progress in Additive Manufacturing*, v. 1, p. 65-78, 2016.

FRITZ, M. M. C. A supply chain view of sustainability management. *Cleaner Production Letters*, v. 3, p. 100023, 2022.

GABRIEL, G. T.; CAMPOS, A. T.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B. Good practices and deficiencies in conceptual modelling: A systematic literature review. *Journal of Simulation*, v. 16, n. 1, p. 84-100, 2022.

GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K.; CHEN, Y.; WILLIAMS, C. B.; WANG, C. C. L.; SHIN, Y. C.; ZHANG, S.; ZAVATTIERI, P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, v. 69, p.65-89, 2015.

GARCIA, F. L.; MORIS, V. A. S.; NUNES, A. O.; SILVA, D. A. L. Environmental performance of additive manufacturing process – an overview. *Rapid Prototyping Journal*, October, 2018.

GARCIA, F. L.; NUNES, A. O.; MARTINS, M. G.; BELLI, M. C.; SAAVEDRA, Y. M.; SILVA, D. A. L.; MORIS, V. A. D. S. Comparative LCA of conventional manufacturing vs. additive manufacturing: the case of injection moulding for recycled polymers. *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 14, n. 6, p. 1604-1622, 2021.

GARWOOD T. L.; HUGHES B. R.; OATES M. R.; O'CONNOR D.; HUGHES R. A review of energy simulation tools for the manufacturing sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p.895-911, 2018.

GBEDEDU, M. A.; LIYANAGE, K.; ORAIFIGE, I. Simulation Aided Life Cycle Sustainability Assessment Framework for Manufacturing Design and Management. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, v. 10, n. 7, 2016.

- GBEDEDU, M. A.; LIYANAGE, K.; GARZA-REYES, J. A. Towards a life cycle sustainability analysis: a systematic review of approaches to sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 184, p. 1002-1015, 2018a.
- GBEDEDU, M. A.; LIYANAGE, K.; MALLIK, S. Holistic Simulation-Based Impact Analysis Framework for Sustainable Manufacturing. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, v. 12, n. 6, p. 828-834, 2018b.
- GBLER, M.; SCHOOT UITERKAMP, A. J. M.; VISSER C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*. v. 74, p. 158-167, 2014.
- GENOVESE, A.; ACQUAYE, A. A.; FIGUEROA, A.; KOH, S.L. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: evidence and some applications. *Omega*, v. 66, Part B, p. 344-357, 2017.
- GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 29, n. 6, p. 910-936, 2018.
- GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level, The Hague, Ministry of VROM, v.1, p.1-126, 2009.
- GOPAL, M.; LEMU, H. G.; GUTEMA, E. M. Sustainable Additive Manufacturing and Environmental Implications: Literature Review. *Sustainability*, v. 15, n. 1, p. 504, 2022.
- GREINER, T. J.; ENVIRONMENTAL, G. Indicators of sustainable production—tracking progress. A case study on measuring eco-sustainability at Guilford of Maine, Inc, v. 1, 2001.
- GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, v. 8, p. 215-243, 2013.
- GUO, M.; MURPHY, R. J. LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. *Science of the Total Environment*, v.435-436, p.230–243, 2012.
- GUTIÉRREZ-OSORIO, A. H.; RUIZ-HUERTA, L.; CABALLERO-RUIZ, A.; SILLER, H. R.; BORJA, V. Energy consumption analysis for additive manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, p. 1735-1743, 2019.
- HADDAD, Y.; YUKSEK, Y. A.; JAGTAP, S.; JENKINS, S.; PAGONE, E.; SALONITIS, K. Eco-social sustainability assessment of manufacturing systems: an LCA-based framework. *Procedia CIRP*, v. 116, p. 312-317, 2023.
- HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. *Simulação: otimizando os sistemas*. 2. Ed. São Paulo: IMAM, 2002.

HASSAN, M. R.; NOH, H.; PARK, K.; JEON, H. W. Simulating energy consumption based on material addition rates for material extrusion of CFR-PEEK: a trade-off between energy costs and cycle time. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 120, n. 7-8, p. 4597-4616, 2022.

HAUSCHILD, M. Z.; JESWIET, J.; ALTING, L. Design for environment-do we get the focus right? *CIRP Annals Manufacturing Technology*. v. 53, n. 1, p. 1-4, 2004.

HEGAB, H.; KHANNA, N.; MONIB, N.; SALEM, A. Design for sustainable additive manufacturing: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, p. e00576, 2023.

HEILALA, J.; VATANEN, S.; TONTERI, H.; MONTONEN, J.; LIND, S.; JOHANSSON, B.; STAHR, J. Simulation-based sustainable manufacturing system design. In: 2008 Winter Simulation Conference. IEEE, p. 1922-1930, 2008.

HENRIKSEN, T.; ASTRUP, T. F.; DAMGAARD, A. Linking data choices and context specificity in life cycle assessment of waste treatment technologies: A landfill case study. *Journal of Industrial Ecology*, v. 22, p. 1039-1049, 2017.

HINES, W.; MONTGOMERY, D. *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*. 3^a ed. New York: John Wiley and Sons, 1990.

HISCHIER, R.; WEIDEMA, B.; ALTHAUS, H. J.; BAUER, C.; DOKA, G.; DONES, R.; FRISCHKNECHT, R.; HELLWEG, S.; HUMBERT, S.; JUNGBLUTH, N.; KÖLLNER, T.; LOERINCİK, Y.; MARGNI, M.; NEMECEK, T. *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. Ecoinvent Report n. 3, v. 2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2010.

HU, Z.; MAHADEVAN, S. Uncertainty quantification and management in additive manufacturing: current status, needs, and opportunities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 93, p. 2855-2874, 2017.

HUANG, Y.; LEU, M. C.; MAZUMBER, J.; DONMEZ, A. Additive Manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. v. 137, n.1, 014001, 2015.

HUANG R.; RIDDLE M.; GRAZIANO D.; WARREN J.; DAS S.; NIMBALKAR S.; CRESKO J.; MASANET E. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p.1559–1570, 2016.

HUANG, R.; RIDDLE, M. E.; GRAZIANO, D.; DAS, S.; NIMBALKAR, S.; CRESKO, J.; MASANET, E. Environmental and economic implications of distributed additive manufacturing: the case of injection mold tooling. *Journal of Industrial Ecology*, v.21, n. S1, p. S130-S143, 2017.

HUIJBREGTS, M. A.; STEINMANN, Z. J.; ELSHOUT, P. M.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; HOLLANDER, P. A.; ZIJP, R. M.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2016 v1.1 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level-report I: characterization. National Inst. Public Health Environ. Netherlands, 104, 2016.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores: Proconve/Promot/Ibama. 2011.

INGARAO, G.; PRIARONE, P.C.; DENG, Y.; PARASKEVAS, D. Environmental modelling of aluminium based components manufacturing routes: Additive manufacturing versus machining versus forming. Journal of Cleaner Production, v. 176, p. 261-275, 2018.

INMETRO. Portaria INMETRO / ME - número 118 - de 11/03/2021. Regulamentos Técnicos Metrológicos e de Avaliação da Conformidade, 11 de Março de 2021.

Disponível em:

http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=2713> Acesso em: 03 de agosto de 2022.

ISLAM, F. Sustainability assessment of direct energy deposition (DED) based hybrid manufacturing using life cycle assessment (LCA) method. West Virginia University, 2021.

ISO/ASTM 52900:2015-12: Additive manufacturing — General principles — Terminology. 2015.

ISO/ASTM 52910:2018(E): Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations. 2018.

ISO 14031. Evaluation of environmental performance. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2013.

ISO 14040. Environmental Management – Life-Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland 2006.

ISO 14044. Environmental Management – Life-Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern recognition letters, v. 31, n. 8, p. 651-666, 2010.

JARED, B. H.; AGUILO, M. A.; BEGHINI, L. L.; BOYCE, B. L.; CLARK, B. W.; COOK, A.; KAEHR, B.J; ROBBINS, J. Additive Manufacturing: toward holistic design. Scripta Materialia, v. 135, p. 141-147, 2017.

- JAYAKRISHNA, K.; SANJAY GUAR, P.; SENTHILKUMAR, R.; AATHIS, N., Sustainability Analysis of Prototyping Processes. *Applied Mechanics and Materials*, v. 867, p. 290-293, 2017.
- JIANG, R.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 117, p. 84-97, 2017.
- JIANG, Q.; LIU, Z.; LI, T.; CONG, W.; ZHANG, H. C. Emery-based life-cycle assessment (Em-LCA) for sustainability assessment: a case study of laser additive manufacturing versus CNC machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 102, p. 4109-4120, 2019.
- JIN, M.; TANG, R.; JI, Y.; LIU, F.; GAO, L.; HUISINGH, D. Impact of advanced manufacturing on sustainability: An overview of the special volume on advanced manufacturing for sustainability and low fossil carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 161, p. 69-74, 2017.
- JOHNSTONE, L. The construction of environmental performance in ISO 14001-certified SMEs. *Journal of Cleaner Production*, n. 263, 121559, 2020.
- JOSHI, S. A review on sustainable supply chain network design: Dimensions, paradigms, concepts, framework and future directions. *Sustainable Operations and Computers*, v. 3, p. 136-148, 2022.
- JOSHI, S. C.; SHEIKH, A. A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 10, n. 4, p. 175-185, 2015.
- JUNG, S.; KARA, L. B.; NIE, Z.; SIMPSON, T. W.; WHITEFOOT, K. S. Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production? *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 16, p. 6373-6386, 2023.
- KAMALI, A. H.; MORADI, M.; GOODARZIAN, F.; GHASEMI, P. A discrete event simulation method for performance analysis of an additive manufacturing in the dental clinic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-31, 2022.
- KATEBI, A.; TUSHMANLO, H. S.; ASADOLLAHFARDI, G. Environmental life cycle assessment and economic comparison of different roof systems. *Journal of Building Engineering*, v. 76, p. 107316, 2023.
- KAZULIS, V.; MUIZNIECE, I.; BLUMBERGA, D. Eco-design analysis for innovative bio-product from forest biomass assessment. *Energy Procedia*, v. 128, p. 368-372, 2017.
- KELLENS, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process lifecycle

inventory (UPLCI)-CO₂PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 1, p. 69-78, 2012.

KELLENS, K.; RENALDI, R.; DEWULF, W.; KRUTH, J. P.; DUFLOU, J. R. Environmental impact modeling of selective laser sintering processes. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 6, p. 459-470, 2014.

KERAMYDAS, C.; MALLIDIS, I.; DEKKER, R.; VLACHOS, D.; IAKOVOU, E. Cost and environmental trade-offs in supply chain network design and planning: the merit of a simulation-based approach. *Journal of Simulation*, v. 11, n. 1, p. 20-29, 2017.

KERDLAP, P.; PURNAMA, A. R.; LOW, J. S. C.; TAN, D. Z. L.; BARLOW, C. Y.; RAMAKRISHNA, S. Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: Applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, v. 26, n. 1, p. 252-271, 2022.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, v. 65, n. 1, p. 50-63, 2014.

KHORRAM, N. M.; NONINO, F.; PALOMBI, G.; TORABI, S. A. Economic sustainability of additive manufacturing: contextual factors driving its performance in rapid prototyping. *Journal of Manufacturing Technology Management*. v. 30 n. 2, p. 353-365, 2018.

KIBIRA, D.; MCLEAN, C. Modeling and simulation for sustainable manufacturing. In: *Proceedings of the 2nd IASTED 2008 Africa Conference on Modeling and Simulation*. p. 11, 2008.

KIM, K.; PARK, K.; JEON, H. W. The Impact of Design Complexity on Additive Manufacturing Performance. In: *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland. p. 227-234, 2022a.

KIM, K.; NOH, H.; PARK, K.; JEON, H. W.; LIM, S. Characterization of power demand and energy consumption for fused filament fabrication using CFR-PEEK. *Rapid Prototyping Journal*, v. 28, n. 7, p. 1394-1406. 2002b.

KIM, D. B.; WITHERELL, P.; LIPMAN, R.; FENG, S. C. Streamlining the additive manufacturing digital spectrum: a system approach. *Additive Manufacturing*. v. 5, p. 20-30, 2015.

KOHTALA, C.; HYYSALO, S. Anticipated environmental sustainability of personal fabrication. *Journal of Cleaner Production*, v. 99, p. 333-344, 2015.

KRAJEWSKI, L.; RITZMAN, L. *Operations management: Strategy and analysis*. 6 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2001.

KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 1, n. 12, p. 1511-1519, 2013.

KREIGER, M.A.; MULDER, M.L.; GLOVER, A.G.; PEARCE, J.M. Life cycle analysis of distributed recycling of postconsumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *Journal of Cleaner Production*, v. 70, p. 90-96, 2014.

KUMAR, A.; LUTHRA, S.; MANGLA, S. K.; KAZANÇOĞLU, Y. COVID-19 impact on sustainable production and operations management. *Sustainable Operations and Computers*, v. 1, p. 1-7, 2020.

LARRAÑETA, E.; DOMINGUEZ-ROBLES, J.; LAMPROU, D. A. Additive manufacturing can assist in the fight against COVID-19 and other pandemics and impact on the global supply chain. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 7, n. 3, p. 100-103, 2020.

LARREA-GALLEGOS, G.; MARVUGLIA, A.; GUTIÉRREZ, T. N.; BENETTO, E. A computational framework for modeling socio-technical agents in the life-cycle sustainability assessment of supply networks. *Sustainable Production and Consumption*, 2024.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. 3^a ed. Boston: McGrawHill, 2000.

LE BOURHIS, F.; KERBRAT, O.; HASCOËT, J. Y.; MOGNOL, P. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 69, n. 9-12, p. 1927-1939, 2013.

LE BOURHIS, F.; KERBRAT, O.; DEMBINSKI, L.; HASCOËT, J. Y.; MOGNOL, P. Predictive model for environmental assessment in additive manufacturing process. *Procedia CIRP*, v.15, p.26-31, 2014.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. D.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, v. 40, p. 2503-2514, 2008.

LEE, J. K. Y.; GHOLAMI, H.; MEDINI, K.; SALAMEH, A. A. Hierarchical analysis of barriers in additive manufacturing implementation with environmental considerations under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, p. 137221, 2023.

LEE, Y. H.; CHO, M. K.; KIM, S. J.; KIM, Y. B. Supply chain simulation with discrete-continuous combined modeling. *Computers & Industrial Engineering*. v.43, n. 1-2, p. 375-392, 2002.

LEMOS, F.; DO NASCIMENTO, T.; DALMARCO, G. FASTEN: An IoT platform for Supply Chain Management in a Covid-19 Pandemic Scenario. *Markets, Globalization & Development Review*. v. 5, n. 4, article 2, 2020.

LIEDER, M.; RASHID, A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 36-51, 2016.

LIU, Z.Y.; LI, C.; FANG, X.Y.; GUO, Y.B. Energy consumption in additive manufacturing of metal parts. *Procedia Manufacturing*, v. 26, p. 834-845, 2018.

LIU, Y.; SYBERFELDT, A. Linking Simulation-Based LCA to Manufacturing Decision Support: An Iron Foundry Case Study. In: *Advances in Manufacturing Technology XXXV: Proceedings of the 19th International Conference on Manufacturing Research, Incorporating the 36th National Conference on Manufacturing Research, 6–8 September 2022, University of Derby, Derby, UK*. IOS Press, p. 325, 2022.

LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches. *Journal of Industrial Ecology*, v. 11, n. 1, p. 161-179, 2007.

LÖFGREN, B.; TILLMAN, A. Relating manufacturing system configuration to life-cycle environmental performance: discrete-event simulation supplemented with LCA. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 17-18, p. 2015-2024, 2011.

LOH, G. H.; PEI, E.; HARRISON, D.; MONZÓN, M. D. An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 23, p. 34-44, 2018.

LUNETTO, V.; PRIARONE, P. C.; KARA, S.; SETTINERI, L. A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing: Additive manufacturing versus Machining case. *Procedia CIRP*, v. 98, p. 406-411, 2021.

LUO, Y.; JI, Z.; LEU, M. C.; CAUDILL, R. Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes. In: *Proceedings of the 1999 IEEE international symposium on electronics and the environment (Cat. No. 99CH36357)*, p. 1-6, May, 1999.

LYU, Z.; PONS, D.; ZHANG, Y. Emissions and Total Cost of Ownership for Diesel and Battery Electric Freight Pickup and Delivery Trucks in New Zealand: Implications for Transition. *Sustainability*, v. 15, n. 10, p. 7902, 2023.

MA, Z.; GAO, M.; WANG, Q.; WANG, N.; LI, L.; LIU, C.; LIU, Z. Energy consumption distribution and optimization of additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 116, p. 3377-3390, 2021.

MA, J.; HARSTVEDT, J.D.; DUNAWAY, D.; BIAN, L.; JARADAT, R. An exploratory investigation of Additively Manufactured Product life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 192, p. 55-70, 2018.

MACIEL, V. G.; WALES, D. J.; SEFERIN, M.; SANS, V. Environmental performance of 3D-Printing polymerisable ionic. *Journal of Cleaner Production*, v. 214, p. 29-40, 2019.

MANCO, P.; CATERINO, M.; RINALDI, M.; FERA, M. Additive manufacturing in green supply chains: A parametric model for life cycle assessment and cost. *Sustainable Production and Consumption*, v. 36, p. 463-478, 2023.

MALSHE, H.; NAGARAJAN, H.; PAN, Y.; HAAPALA, K. Profile of sustainability in additive manufacturing and environmental assessment of a novel stereolithography process. In: *Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 2015.

MANGLA, S. K.; KAZANCOGLU, Y.; SEZER, M. D.; TOP, N.; SAHIN, I. Optimizing fused deposition modelling parameters based on the design for additive manufacturing to enhance product sustainability. *Computers in Industry*, v.145, p.103833, 2023

MANI, M.; LYONS, K.W.; GUPTA, S.K. Sustainability characterization for additive manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 119, n. 419, p.419-428, 2014.

MANN, A.; SAXENA, P.; ALMANEI, M.; OKORIE, O.; SALONITIS, K. Environmental Impact Assessment of Different Strategies for the Remanufacturing of User Electronics. *Energies*, v. 15, n. 7, p. 2376, 2022.

MANNERS-BELL, J.; LYON, K. The implications of 3D printing for the global logistics industry. *Transport Intelligence*, v. 1, p. 1-5, 2012.

MAYER, R. J.; CRUMP, J. W.; FERNANDES, R.; KEEN, A.; PAINTER, M. K. Information integration for concurrent engineering (IICE) compendium of methods report (p. 149). Air Force Materiel Command, 1995.

MELLOR, S.; HAO, L.; ZHANG, D. Additive manufacturing a framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, v. 149, p. 194-201, 2014.

MENDES, L.; KANGAS, A.; KUKKO, K.; MØLGAARD, B.; SÄÄMÄNEN, A.; KANERVA, T.; ITUARTE I. F.; HUHTINIEMI M.; STOCKMANN-JUVALA, H.; PARTANEN, J.; HÄMERI, K.; ELEFTHERIADIS, K.; VIITANEN, A. K. Characterization of emissions from a desktop 3D printer. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. S1, p. S94-S106, 2017.

- METEYER, S.; XU, X.; PERRY, N.; ZHAO, Y.F. Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. *Procedia CIRP*, v. 15, p. 19-25, 2014.
- MOGNOL, P.; LEPICART, D.; PERRY, N. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight. *Rapid Prototyping Journal*, v. 12, n. 1, p. 26-34, 2006.
- MOLDAN, B.; JANOUŠKOVÁ, S.; HÁK, T. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. *Ecological indicators*, v. 17, n. 4-13, 2012.
- MONTEVECHI, J. A. B.; DE OLIVEIRA, M. L. M.; LEAL, F.; DE PINHO, A. F. Analysis of the applicability of the IDEF-SIM modeling technique to the stages of a discrete event simulation project. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference* (pp. 950-961). IEEE, 2014.
- MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; DE PINHO, A. F.; COSTA, R. F.; DE OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (pp. 1624-1635). IEEE, 2010.
- MOORE, T. A.; MCCONNELL, B. M.; WILSON, J. R. Simulation-based evaluation on integrating additive manufacturing capability in a deployed military environment. In: *2018 Winter Simulation Conference (WSC) - IEEE*, p. 3721-3729, 2018.
- MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; BERNIDAKI, D. Simulation in manufacturing: review and challenges. *Procedia CIRP*. v. 25, p. 213-229, 2014.
- MOURTZIS, D.; DOUKAS, M.; PSAROMMATIS, F. Environmental impact of centralised and decentralised production networks in the era of personalisation. In: *Robust Manufacturing Control: Proceedings of the CIRP Sponsored Conference RoMaC 2012, Bremen, Germany, 18th-20th June 2012*. Springer Berlin Heidelberg. p. 371-384, 2013.
- NAGARAJAN, H. P. N.; MALSHE, H. A.; HAAPALA, K. R.; PAN, Y. Environmental performance evaluation of a fast mask image projection stereolithography process through time and energy modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v. 138, n. 10, p. 101004, 2016.
- NAWROCKA, D.; PARKER, T. Finding the connection: environmental management systems and environmental performance. *Journal of cleaner production*, n.17, v. 6, p. 601-607, 2009.
- NEIJHOFT, J.; VIERTMANN, T.; MEIER, S.; SÖHLING, N.; WICKER, S.; HENRICH, D.; MARZI, I. Manufacturing and supply of face shields in hospital operation in case of unclear and confirmed COVID-19 infection status of patients. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, v. 46, p. 743-745, 2020.

OROS DARABAN, A. E.; NEGREA, C. S.; ARTIMON, F. G.; ANGELESCU, D.; POPAN, G.; GHEORGHE, S. I.; GHEORGHE, M. A deep look at metal additive manufacturing recycling and use tools for sustainability performance. *Sustainability*, v. 11, n. 19, p. 5494, 2019.

PAGE, B.; WOHLGEMUTH, V. Advances in environmental informatics: integration of discrete event simulation methodology with ecological material flow analysis for modelling eco-efficient systems. *Procedia Environmental Sciences*, v. 2, p. 696-705, 2010.

PAJU, M.; HEILALA, J.; HENTULA, M.; HEIKKILÄ, A.; JOHANSSON, B.; LEONG, S.; LYONS, K. Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. IEEE, p. 3411-3422, 2010.

PARIS, H.; MANDIL, G. Environmental impact assessment of an innovative strategy based on an additive and subtractive manufacturing combination. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 508-523, 2017.

PARIS, H.; MOKHTARIAN, H.; COATANÉA, E.; MUSEAU, M.; ITUARTE, I. F. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 65, n. 1, p. 29-32, 2016.

PELLETIER, N.; ARDENTE, F.; BRANDÃO, M.; DE CAMILLIS, C.; PENNINGTON, D. Rationales for and limitations of preferred solutions for multi-functionality problems in LCA: is increased consistency possible? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 20, p. 74-86, 2015.

PENG, T. Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes. *Procedia CIRP*, v. 40, p.62–67, 2016.

PENG, T.; KELLENS, K.; TANG, R.; CHEN, C.; CHEN, G. Sustainability of additive manufacturing: an overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, v. 21, p. 694-704, 2018.

PEREIRA, T. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; DE MIRANDA, R. C.; FRIEND, J. D. Integrating soft systems methodology to aid simulation conceptual modeling. *International Transactions in Operational Research*, v. 22, n. 2, p. 265–285, 2015.

POTTING, J.; HAUSCHILD, M. Z. Spatial differentiation in life cycle impact assessment - A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 11, p. 11-13, 2006.

PRAKASH, K. S.; NANCHARAIH, T.; SUBBA RAO, V.V. Additive manufacturing techniques in manufacturing - an overview. *Materials Today: Proceedings*, v.5, p. 3873-3882, 2018.

PRIARONE, P.C.; INGARAO, G. Towards criteria for sustainable process selection: on the modelling of pure subtractive versus additive/subtractive integrated manufacturing approaches. *Journal of Cleaner Production*, v. 144, p. 57-68, 2017.

PRINTABLES (2023) Disponível em: <<https://www.printables.com/model/25857-prusa-face-shield>> Acesso em: 10 de março de 2023.

RABELO, L.; HELAL, M.; JONES, A.; MIN, H. Enterprise simulations: a hybrid system approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. v.18, n.6, p. 498-508, 2005.

RAGAB, A.; OSAMA, A.; RAMZY, A. Simulation of the Environmental Impact of Industries in Smart Cities. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 14, n. 6, p. 102103, 2023.

RAHN, A.; WICKE, K.; WENDE, G. A Comparison of Temporally Dynamic Life Cycle Assessment Methods for Ecological Evaluation in Aviation. *Procedia CIRP*, v. 116, n. 149-154, 2023.

RAHN, A.; WICKE, K.; WENDE, G. Using Discrete-Event Simulation for a Holistic Aircraft Life Cycle Assessment. *Sustainability*, v. 14, n. 17, p. 10598, 2022.

RANJBARI, M.; ESFANDABADI, Z. S.; ZANETTI, M. C.; SCAGNELLI, S. D.; SIEBERS, P. O.; AGHBASHLO, M., PENG, W.; QUATRARO, F.; TABATABAEI, M. Three pillars of sustainability in the wake of COVID-19: A systematic review and future research agenda for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126660, 2021.

RANSIKARBUM, K.; HA, S.; MA, J.; KIM, N.; Multi-objective optimization analysis for part-to-Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 43, p. 35-46, 2017.

RAO, R. V.; RAI, D. P. Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 19, n. 1, p. 587-603, 2016.

RAVICHANDRAN, M.; VIMAL, K. E. K.; KUMAR, V.; KULKARNI, O.; GOVINDASWAMY, S.; KANDASAMY, J. Environment and economic analysis of reverse supply chain scenarios for remanufacturing using discrete-event simulation approach. *Environment, Development and Sustainability*, p.1-42, 2023.

REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG, Y. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 19, p. 21-28, 2018.

RIBEIRO, I.; MATOS, F.; JACINTO, C.; SALMAN, H.; CARDEAL, G.; CARVALHO, H.; GODINA, R.; PEÇAS, P. Framework for life cycle sustainability assessment of additive manufacturing. *Sustainability*, v. 12, n.3, p. 929, 2020.

RINALDI, M.; CATERINO, M.; FERA, M.; MANCO, P.; MACCHIAROLI, R. Technology selection in green supply chains-the effects of additive and traditional manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 282, p. 124554, 2021.

RINALDI, M.; CATERINO, M.; MACCHIAROLI, R. Additive manufacturing and supply chain configuration: Modelling and performance evaluation. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 15, n. 1, p. 103-123, 2022.

ROBINSON, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. 1^a ed. New York: John Wiley and Sons, 2004.

RÖDGER, J. M.; BEIER, J.; SCHÖNEMANN, M.; SCHULZE, C.; THIEDE, S.; BEY, N.; HERRMANN, C.; HAUSCHILD, M. Z. Combining life cycle assessment and manufacturing system simulation: evaluating dynamic impacts from renewable energy supply on product-specific environmental footprints. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, v. 8, p. 1007-1026, 2021.

RODIC, B.; KANDUC, T. Optimisation of a complex manufacturing process using discrete event simulation and a novel heuristic algorithm. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. v. 9, p. 320-328, 2015.

ROSENBAUM, R. K.; HAUSCHILD, M. Z.; BOULAY, A. M.; FANTKE, P.; LAURENT, A.; NÚÑEZ, M.; VIEIRA, M. Life cycle impact assessment. *Life cycle assessment: theory and practice*, 167-270. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, RALPH K.; OLSEN, STIG I. *Life cycle assessment*. Springer International Publishing, Cham, 2018.

ROY, S.; DAS, M.; ALI, S. M.; RAIHAN, A. S.; PAUL, S. K.; KABIR, G. Evaluating strategies for environmental sustainability in a supply chain of an emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 262, p. 121389, 2020.

RÜBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. Boston Consulting Group, Boston, MA, 2015.

SAADE, M. R. M.; YAHIA, A.; AMOR, B. How has LCA been applied to 3D printing? A systematic literature review and recommendations for future studies. *Journal of Cleaner Production*, v. 244, p.118803, 2020.

SALTELLI, A.; JAKEMAN, A.; RAZAVI, S.; WU, Q. Sensitivity analysis: A discipline coming of age. *Environmental Modelling & Software*, v. 146, p. 105226, 2021.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: Proceedings of the 2010 winter simulation conference. IEEE, p. 166-183, 2010.

SEOW, Y.; RAHIMIFARD, S.; WOOLLEY, E. Simulation of energy consumption in the manufacture of a product. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 26, n. 7, 663-680, 2013.

SHAKIROV, E.; GEE, K.; QUINLAN, H.; HART, A. J.; FORTIN, C.; UZHINSKY, I. Simulating the AM Production Facility: A Configurable Software Tool for Strategic Facility-Level Planning. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, v. 84263, p. V002T07A014, 2020.

SHARMA, M.; KUMAR, A.; LUTHRA, S.; JOSHI, S.; UPADHYAY, A. The impact of environmental dynamism on low-carbon practices and digital supply chain networks to enhance sustainable performance: An empirical analysis. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 4, p. 1776-1788, 2022.

SHARMA, A.; RAI, A. Fused deposition modelling (FDM) based 3D & 4D Printing: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, v. 62, p. 367-372, 2022.

SHI, Y.; FALUDI, J. Using life cycle assessment to determine if high utilization is the dominant force for sustainable polymer additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 35, p. 101307, 2020.

SHIN, S. J.; SUH, S. H.; STROUD, I.; YOON, S. Process-oriented life cycle assessment framework for environmentally conscious manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 28, p. 1481-1499, 2017.

SHOKRANI, A.; LOUKAIDES, E. G.; ELIAS, E.; LUNT, A. J. Exploration of alternative supply chains and distributed manufacturing in response to COVID-19; a case study of medical face shields. *Materials & Design*, v.192, p. 108749, 2020.

SHUAIB, M.; HALEEM, A.; KUMAR, S.; JAVAID, M. Impact of 3D Printing on the environment: A literature-based study. *Sustainable Operations and Computers*, v. 2, p. 57-63, 2021.

SICV Brasil - Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. O que é SICV Brasil? Disponível em: <<http://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv>> Acesso em: 20 de maio 2023.

SIMAPRO. SimaPro database manual Methods library, 2022. Disponível em: <<https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>> Acesso em: 22 de maio 2023.

SINGH, S.; RAMAKRISHNA, S.; SINGH, R. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 25, p. 185–200, 2017.

SINGH, D.; REDDY, A. R.; ARJULA, S. Characterization of Additive Manufactured PETG and Carbon Fiber — PETG. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, v. 4, p. 152-156, 2018.

SMITH, S. P.; JAIN, A. K. Testing for uniformity in multidimensional data. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, n. 1, p. 73-81, 1984.

SOLAIMANI, S.; PARANDIAN, A.; NABIOLLAHI, N. A holistic view on sustainability in additive and subtractive manufacturing: A comparative empirical study of eyewear production systems. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 10775, 2021.

SOLDING, P.; PETKU, D.; MARDAN, N. Using simulation for more sustainable production systems—methodologies and case studies. *International Journal of Sustainable Engineering*, v. 2, n. 2, p. 111-122, 2009.

SON, D.; KIM, S.; JEONG, B. Sustainable part consolidation model for customized products in closed-loop supply chain with additive manufacturing hub. *Additive Manufacturing*, v. 37, p. 101643, 2021.

SONNEMANN G.; CASTELLS F.; SCHUHMACHER M.; HAUSCHILD M. Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 9, n. 3, p. 206-207, 2004.

SPROEDT, A.; PLEHN, J.; SCHÖNSLEBEN, P.; HERRMANN, C. A simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems. *Journal of Cleaner Production*, n. 105, p. 389-405, 2015.

SREENIVASAN, R.; BOURELL, D. L. Sustainability study in selective laser sintering—an energy perspective. In: 2009 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, pp. 257–265, 2009.

STANKIEWICZ, S. K.; AURAS, R.; SELKE, S. Modeling American household fluid milk consumption and their resulting greenhouse gas emissions. *Sustainability*, v. 11, n. 7, p. 2152, 2019.

STEINLE, P. Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, v. 13, n. 2, p. 121-132, 2016.

STEPHENS, B.; AZIMI, P.; EL ORCH, Z.; RAMOS, T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmospheric Environment*, v. 79, p. 334-339, 2013.

STIEL, F.; MICHEL, T.; TEUTEBERG, F. Enhancing manufacturing and transportation decision support systems with LCA add-ins. *Journal of Cleaner Production*, v. 110, p. 85-98, 2016.

STRONG, D.; KAY, M.; CONNER, B.; WAKEFIELD, T.; MANOGHARAN, G. Hybrid manufacturing—integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain. *Additive Manufacturing*, v. 21, p. 159-173, 2018.

SU, D.; REN, Z.; WU, Y. Guidelines for selection of life cycle impact assessment software tools. *Sustainable Product Development: Tools, Methods and Examples*, p. 57-70, 2020.

SUÁREZ, L.; DOMÍNGUEZ, M. Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 106, p. 1267-1279, 2020.

SUH, S.; LEIGHTON, M.; TOMAR, S.; CHEN, C. Interoperability between Ecoinvent ver. 3 and US LCI database: a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 9, p. 1290-1298, 2016.

SULTAN, F. A.; ROUTROY, S.; THAKUR, M. A simulation-based performance investigation of downstream operations in the Indian Surimi Supply Chain using environmental value stream mapping. *Journal of Cleaner Production*, v. 286, p. 125389, 2021.

SUN, H.; PEDRIELLI, G.; ZHAO, G.; ZHOU, C.; XU, W.; PAN, R. Cyber coordinated simulation for distributed multi-stage additive manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 57, p. 61-71, 2020.

TADDESE, G.; DURIEUX, S.; DUC, E. Sustainability performance indicators for additive manufacturing: a literature review based on product life cycle studies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 107, p. 3109-3134, 2020.

TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, v. 52, p. 802-815, 2012.

TANG, O.; MUSA, S. N. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, v. 133, n. 1, p. 25-34, 2011.

TANG, Y.; MAK, K.; ZHAO, Y. F. A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1560-1572, 2016.

THIEDE, S.; SEOW, Y.; ANDERSSON, J.; JOHANSSON, B. Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research

perspectives. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 6, n. 1, p. 78-87, 2013.

THOMAS, D. Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 85, p. 1857-1876, 2016.

TIAN, X.; WU, L.; GU, D.; YUAN, S.; ZHAO, Y.; LI, X.; ... LI, D.; Roadmap for additive manufacturing: toward intellectualization and industrialization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, n. 1, v. 1, p. 100014, 2022.

TOFAIL, S. A.; KOUMOULOS, E. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S.; O'DONOGHUE, L.; CHARITIDIS, C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

TOYSERKANI, E.; SARKER, D.; IBHADODE, O. O.; LIRAVI, F.; RUSSO, P.; TAHERKHANI, K. *Metal additive manufacturing*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021.

ULLAH, A.S.; HASHIMOTO, H.; KUBO, A.; TAMAKI, J.I. Sustainability analysis of rapid prototyping: material/ resource and process perspectives. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, v. 3, n. 1, p. 20-36, 2013.

UNITED NATIONS (UN). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. UN General Assembly, 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals>> Acesso em: 17 de agosto de 2023.

VALDIVIA, S.; UGAYA, C. M.; HILDENBRAND, J.; TRAVERSO, M.; MAZIJN, B.; SONNEMANN, G. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment - our contribution to Rio+ 20. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v.18, p. 1673-1685, 2013.

VAHABLI, E.; RAHMATI, S. Hybrid estimation of surface roughness distribution in FDM parts using analytical modeling and empirical investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 88, p. 2287-2303, 2017.

VALERGA, A. P.; BATISTA, M.; SALGUERO, J.; GIROT, F. Influence of PLA filament conditions on characteristics of FDM parts. *Materials*, v. 11, n. 8, p. 1322, 2018.

VDI 3405. *Additive manufacturing processes, rapid manufacturing – Basics, definitions, processes*. Beuth: Berlin. 2014.

VIANNA, F.; LEAL, G. H.; TAVARES, L. A. O.N.D.E. - Onde was Not Developed for a Esthetics (Version 2.0.0) [Computer software], 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.8260059>" \t " blank >

- VÝTISK, J.; KOČÍ, V.; HONUS, S.; VRTEK, M. Current options in the life cycle assessment of additive manufacturing products. *Open Engineering*, v. 9, n. 1, p. 674-682, 2019.
- WAN, G.; DAWOD, A. Y.; CHANAIM, S.; RAMASAMY, S. S. Hotspots and trends of environmental, social and governance (ESG) research: A bibliometric analysis. *Data Science and Management*, 2023.
- WANG, B.; BRÊME, S.; MOON, Y. B. Hybrid modeling and simulation for complementing Lifecycle Assessment. *Computers & Industrial Engineering*, v. 69, p. 77-88, 2014.
- WANG, Y.; MA, H. S.; YANG, J. H.; WANG, K. S. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, v. 5, n. 4, p. 311-320, 2017.
- WATSON, J.K.; TAMINGER, K.M.B. A decision support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*. v. 176, p. 1316-1322, 2018.
- WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. Overview and methodology: Data quality guideline for theecoinvent database version 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. *Ecoinvent Report*, v. 3, n. 1, 2013.
- WIDOK, A. H.; SCHIEMANN, L.; JAHR, P.; WOHLGEMUTH, V.; Achieving sustainability through a combination of LCA and DES integrated in a simulation software for production processes. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, p. 1-12, 2012.
- WOODSON, T.S. 3D printing for sustainable industrial transformation. *Development*, v. 58, n. 4, p. 571-576, 2016.
- WU, H.; MEHRABI, H.; NAVEED, N.; KARAGIANNIDIS, P. Impact of strategic control and supply chain management on recycled plastic additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 364, p. 132511, 2022.
- XU, X.; RODGERS, M. D; GUO, W. Hybrid simulation models for spare parts supply chain considering 3D printing capabilities. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 59, p. 272-282, 2021.
- YANG, S.; TALEKAR, T.; SULTHAN, M.A.; ZHAO, Y.F. A generic sustainability assessment model towards consolidated parts fabricated by additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, v. 10, p. 831-844, 2017a.

- YANG, Y.; LI, L.; PAN, Y.; SUN, Z. Energy consumption modeling of stereolithography-based additive manufacturing toward environmental sustainability. *Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. S1, p. S168-S178, 2017b.
- YEBI, A.; AYALEW, B. Hybrid Modeling and Robust Control for Layer-by-Layer Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 25, n. 2, p. 550-562, 2017.
- YI, L.; GLATT, M.; SRIDHAR, P.; DE PAYREBRUNE, K.; LINKE, B. S.; RAVANI, B.; AURICH, J. C. An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment. *Additive Manufacturing*, v. 33, p. 101120, 2020.
- YOSOFI, M.; KERBRAT, O.; MOGNOL, P. Energy and material flow modelling of additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 13, n. 2, p. 83-96, 2018.
- YU, F.; YANG, Y.; CHEN, L.; SHENG, X.; YUAN, X.; WANG, Q.; MA, Q.; ZUO, J. Assessment of system sustainability: a critical review of the combined application of system dynamics and life cycle assessment. *Energy, Ecology and Environment*, p. 1-10, 2024.
- YUAN, C.; WANG, F.; ROSEN, D. W.; GE, Q. Voxel design of additively manufactured digital material with customized thermomechanical properties. *Materials & Design*, v. 197, 109205, 2021.
- ZANONI, S.; ASHOURPOUR, M.; BACCHETTI, A.; ZANARDINI, M.; PERONA, M. Supply chain implications of additive manufacturing: a holistic synopsis through a collection of case studies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 102, p. 3325-3340, 2019.
- ZHANG, A.; ALVI, M. F.; GONG, Y.; WANG, J. X. Overcoming barriers to supply chain decarbonization: Case studies of first movers. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 186, p. 106536, 2022.
- ZHANG, Y.; JEDECK, S.; YANG, L.; BAI, L. Modeling and analysis of the on-demand spare parts supply using additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, v. 25, n. 3, p. 473-487, 2019.
- ZHOU, Y.; CHEN, H.; TANG, Y.; et al. Simulation and optimization framework for additive manufacturing processes. In: *Proceedings of The 2014 International Conference on Innovative Design and Manufacturing (ICIDM)*, p. 34-40, 2014.
- ZIJLSTRA, V.; BASTEN, R.; JULSING, T. Printing in the Army: Where to locate additive manufacturing capabilities in a remote spare parts supply chain? *IFAC-PapersOnLine*, v. 55, n. 10, p. 1165-1170, 2022.

8. APÊNDICES

APÊNDICE A - Revisões de Literatura

Quadro 8.1 - Revisões de literatura sobre LCA-AM (continua)

Estudo	Objetivo/Escopo do estudo	Resultados das revisões que justificam o presente estudo
Garcia et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam uma visão geral da literatura sobre o desempenho ambiental de AM e avalia o uso da LCA nesses estudos. • 43 artigos analisados. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) O consumo de energia dos equipamentos foi o principal aspecto ambiental estudado. (2) 25% dos estudos utilizaram ACV pelo menos em algum nível, fazendo uma avaliação ambiental global para avaliar os impactos ambientais da AM.
Peng et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam uma visão geral da Sustentabilidade da Manufatura Aditiva com foco nos impactos energéticos e ambientais. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) O consumo de recursos/materiais é identificado como o aspecto mais importante. (2) Sugerem oportunidades para reduzir consumo de energia e materiais nas etapas de projeto, preparação de materiais, fabricação, uso e fim de vida. (3) Identificaram poucos processos e sistemas AM estudados a partir de LCA, e com conclusões prematuras. (4) Necessidade de desenvolvimento de modelos gerais para cada tipo de processo AM. (5) Há dificuldades metodológicas na aplicação da LCA, como medições diretas limitadas dos impactos ambientais da AM e inventário com dados insuficientes ou não confiáveis.
Rejeski et al. (2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Abordam implicações ambientais de AM relacionadas com questões-chave como: utilização de energia, saúde ocupacional, resíduos, impacto do ciclo de vida e questões transversais e políticas. • Indicam necessidades de investigação e recomendações. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) Há limitação de dados disponíveis sobre a fabricação de matérias-primas de AM e o consumo de energia, o que acarreta na utilização de estimativas e acrescenta incertezas significativas nos resultados da LCA. (2) Necessidade de pesquisas sobre o impacto do consumo de energia em cenários de produção distribuída com AM. (3) Existem lacunas significativas de dados a montante e a jusante do processo aditivo, desde a fabricação de matéria-prima até gestão do fim da vida. (4) Muitos dos dados utilizados são gerados em laboratório. (5) Necessidade de coleta e compartilhamento de dados relacionados à LCA-AM de processos aditivos e de cadeias de suprimentos com AM.
Agrawal e Vinodh (2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Abordam a sustentabilidade de AM nos aspectos ambiental, econômico e social. • 63 trabalhos analisados. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) Destacam o consumo de energia como elemento importante no desempenho ambiental e na avaliação do ciclo de vida. (2) Sugerem a necessidade de desenvolvimento de modelos para avaliar os impactos ambientais de AM. (3) Identificam a falta de dados sobre consumo de recursos e emissões em processos aditivos. (4) Bancos de dados de inventário abrangentes devem ser desenvolvidos para vários processos AM.
Saade et al. (2020)	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliam criticamente a literatura disponível sobre os impactos ambientais do ciclo de vida da AM e identifica os principais desafios e tendências • 52 trabalhos analisados. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) Identificaram problemas de robustez na aplicação dos métodos de LCA, devido à falta de transparência em muitos artigos. (2) Destacam que a LCA desempenha um papel significativo na avaliação e comparação de processos produtivos. (3) Apontam a LCA como uma alternativa valiosa na análise de competitividade e do desempenho ambiental da tecnologia de AM.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quadro 8.1 - Revisões de literatura sobre LCA-AM (conclusão)

Estudo	Objetivo/Escopo do estudo	Resultados das revisões que justificam o presente estudo
Gopal et al. (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Examinam o estado da arte AM e avalia o impacto ambiental da tecnologia. • 135 trabalhos analisados. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) O desperdício de materiais e o uso de energia são duas questões críticas dos processos AM que exigem atenção imediata. (2) A LCA tem sido uma opção utilizada para avaliar o desempenho ambiental da AM. (3) Existem lacunas de dados relevantes para a LCA, tanto a montante quanto a jusante do processo aditivo, o que limitam a utilidade prática dos estudos LCA-AM para o desenvolvimento de produtos/processos e formulação de políticas. (4) O consumo de energia tem foco nos níveis de processo e máquina, com poucos estudos que considerem ligação entre o consumo de energia e a eficiência de distribuição matérias-primas, componentes e produtos.
Hegab et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam os elementos de sustentabilidade de AM e lacunas de pesquisa. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) As pesquisas sobre a sustentabilidade da AM estão no estágio preliminar. (2) Necessidade de estudos estruturados para análise da sustentabilidade ambiental com foco na gestão de energia e na descentralização de produção. (3) Falta de informação e compreensão do desempenho ambiental do processamento de materiais. (4) Falta de compreensão do desempenho ambiental de tecnologias AM, redes de suprimentos com AM e produtos gerados com AM. (5) Necessidade de ferramentas confiáveis de avaliação de sustentabilidade para processos AM. (6) Estudos de LCA baseados em muitas suposições. Há dificuldades no gerenciamento adequado do fluxo de informações ao longo do ciclo de vida de um produto e dos sistemas AM.
Jung et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliam estudos comparativos de impactos ambientais e os custos da AM em relação aos métodos tradicionais de fabricação. • Identificam as condições sob as quais a AM é uma alternativa ambiental e economicamente viável. 	<ol style="list-style-type: none"> (1) A AM tem menores impactos ambientais quando os volumes de produção são muito baixo. (2) Os maiores impactos ambientais relativos à produção AM de grandes volumes de produção podem ser compensados pela: <ul style="list-style-type: none"> - Redução dos impactos e custos ambientais do ciclo de vida; e - Eliminação de componentes da cadeia de suprimentos, reduzindo os impactos ambientais e custos associados ao transporte e às operações das instalações. (3) Estudos comparativos de AM e métodos de fabricação tradicionais devem incluir métricas de consumo de energia e/ou emissões de CO₂, de toxicidade humana e de custos na avaliação do ciclo de vida como métricas de comparação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE B - Dados de demanda e atendimento do HUB

Tabela 8.1 - Dados de demanda e *lead time* de entrega para distribuição (continua)

DEMANDANTE	DEMANDA (unidades)	DATA DO PEDIDO	DATA DE DISPONIBILIZAÇÃO PARA ENTREGA	LEAD TIME DE ENTREGA PARA DISTRIBUIÇÃO (DIAS)	QUANTIDADE DISPONÍVEL PARA DISTRIBUIÇÃO (unidades)
Instituição 34	65	24/03/2020	28/04/2020	35,00	65
Instituição 34	300	24/03/2020	06/05/2020	43,00	100
			11/05/2020	48,00	100
			12/05/2020	49,00	100
Instituição 35	200	28/03/2020	28/03/2020	0,00	30
			02/04/2020	5,00	120
			06/04/2020	9,00	50
Instituição 36	20	31/03/2020	31/03/2020	0,00	10
			02/04/2020	2,00	10
Instituição 36	10	31/03/2020	31/03/2020	0,00	10
Instituição 42	40	31/03/2020	28/04/2020	28,00	40
Instituição 21	150	01/04/2020	09/04/2020	8,00	50
			13/04/2020	12,00	50
			16/04/2020	15,00	50
Instituição 19	60	02/04/2020	02/04/2020	0,00	60
Instituição 8	110	02/04/2020	02/04/2020	0,00	60
			13/04/2020	11,00	50
Instituição 35	100	02/04/2020	15/04/2020	13,00	50
			16/04/2020	14,00	50
Instituição 34	3	03/04/2020	06/04/2020	3,00	3
Instituição 5	25	06/04/2020	06/04/2020	0,00	25
Instituição 4	50	06/04/2020	06/04/2020	0,00	50
Instituição 18	50	06/04/2020	07/04/2020	1,00	50
Instituição não identificada	4	06/04/2020	07/04/2020	1,00	4
Instituição 30	60	06/04/2020	09/04/2020	3,00	40
			15/04/2020	9,00	20
Instituição 20	120	07/04/2020	07/04/2020	0,00	100
			15/04/2020	8,00	20
Instituição não identificada	4	07/04/2020	14/04/2020	7,00	4
Instituição 35	4	07/04/2020	15/04/2020	8,00	4
Instituição 24	20	07/04/2020	28/05/2020	51,00	20
Instituição 2	30	08/04/2020	28/04/2020	20,00	30
Instituição 22	30	09/04/2020	09/04/2020	0,00	30
Instituição 46	20	09/04/2020	28/04/2020	19,00	20
Instituição 34	10	13/04/2020	15/04/2020	2,00	10
Instituição 36	20	13/04/2020	17/04/2020	4,00	20
Instituição 17	30	13/04/2020	18/05/2020	35,00	30
Instituição 34	10	14/04/2020	14/04/2020	0,00	10
Instituição 6	20	14/04/2020	20/04/2020	6,00	20
Instituição 39	20	15/04/2020	28/04/2020	13,00	10
			01/05/2020	16,00	10
Instituição 34	10	15/04/2020	28/04/2020	13,00	10
Instituição 35	10	16/04/2020	16/04/2020	0,00	10
Instituição não identificada	3	16/04/2020	18/05/2020	32,00	3
Instituição 34	200	24/04/2020	25/05/2020	31,00	100
			27/05/2020	33,00	100
Instituição 33	2780	24/04/2020	04/06/2020	41,00	200
			16/06/2020	53,00	60
			22/06/2020	59,00	180
			06/07/2020	73,00	260
			23/06/2020	60,00	80
			16/08/2020	114,00	2000
Instituição 12	20	26/04/2020	05/05/2020	9,00	20
Instituição 34	35	27/04/2020	27/04/2020	0,00	35
Instituição 34	2	27/04/2020	27/04/2020	0,00	2
Instituição 34	5	27/04/2020	27/04/2020	0,00	5
Instituição 10	10	27/04/2020	18/05/2020	21,00	10
Instituição 44	30	28/04/2020	28/04/2020	0,00	30
Instituição 28	20	28/04/2020	28/04/2020	0,00	20
Instituição 34	5	28/04/2020	29/04/2020	1,00	5
Instituição 34	100	28/04/2020	07/05/2020	9,00	100
Instituição 34	200	28/04/2020	18/05/2020	20,00	100
			20/05/2020	22,00	100
Instituição 8	20	28/04/2020	19/05/2020	21,00	20
Instituição 16	25	30/04/2020	01/06/2020	32,00	25
Instituição 25	25	01/05/2020	01/05/2020	0,00	25
Instituição 31	30	04/05/2020	12/05/2020	8,00	30
Instituição 1	30	04/05/2020	01/06/2020	28,00	30
Instituição não identificada	10	07/05/2020	18/05/2020	11,00	10
Instituição 34	15	07/05/2020	10/06/2020	34,00	15
Instituição 43	25	08/05/2020	10/05/2020	2,00	25
Instituição não identificada	4	11/05/2020	10/06/2020	30,00	4
Instituição 34	10	12/05/2020	12/05/2020	0,00	10
Instituição 26	15	13/05/2020	13/05/2020	0,00	15
Instituição 34	200	18/05/2020	18/05/2020	0,00	200
Instituição 7	20	18/05/2020	18/05/2020	0,00	20
Instituição 33	300	18/05/2020	18/05/2020	0,00	300
Instituição 3	40	20/05/2020	06/07/2020	47,00	40
Instituição 41	120	26/05/2020	01/06/2020	6,00	120
Instituição 34	7	29/05/2020	29/05/2020	0,00	7

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 8.1 - Dados de demanda e *lead time* de entrega para distribuição (conclusão)

DEMANDANTE	DEMANDA (unidades)	DATA DO PEDIDO	DATA DE DISPONIBILIZAÇÃO PARA ENTREGA	LEAD TIME DE ENTREGA PARA DISTRIBUIÇÃO (DIAS)	QUANTIDADE DISPONÍVEL PARA DISTRIBUIÇÃO (unidades)
Instituição 34	350	01/06/2020	01/06/2020	0,00	100
			04/06/2020	3,00	100
			09/06/2020	8,00	150
Instituição 11	10	04/06/2020	04/06/2020	0,00	10
Instituição 37	40	05/06/2020	02/07/2020	27,00	40
Instituição 43	40	05/06/2020	06/07/2020	31,00	40
Instituição 15	7	10/06/2020	10/06/2020	0,00	7
Instituição não identificada	10	10/06/2020	10/06/2020	0,00	10
Instituição não identificada	50	10/06/2020	10/06/2020	0,00	50
Instituição 32	30	16/06/2020	16/06/2020	0,00	30
Instituição 40	20	16/06/2020	16/06/2020	0,00	20
Instituição 34	260	22/06/2020	22/06/2020	0,00	180
			23/06/2020	1,00	80
Instituição 34	1420	30/06/2020	21/07/2020	21,00	220
			10/07/2020	10,00	140
			28/07/2020	28,00	160
			31/07/2020	31,00	120
			07/08/2020	38,00	200
			14/08/2020	45,00	200
			25/08/2020	56,00	380
Instituição 33	15	30/07/2020	30/07/2020	0,00	15
Instituição 34	8	03/08/2020	03/08/2020	0,00	8
Instituição 23	100	05/08/2020	17/08/2020	12,00	100
Instituição 9	80	12/08/2020	15/09/2020	34,00	80
Instituição 38	20	17/08/2020	17/08/2020	0,00	20
Instituição 29	60	21/08/2020	21/08/2020	0,00	60
Instituição 18	100	01/09/2020	01/09/2020	0,00	100
Instituição não identificada	200	01/09/2020	01/09/2020	0,00	200
Instituição 45	150	02/09/2020	09/09/2020	7,00	150
Instituição 34	4	03/09/2020	03/09/2020	0,57	4
Instituição 14	30	07/09/2020	09/09/2020	2,00	30
Instituição 34	200	08/09/2020	10/09/2020	2,00	200
Instituição 35	1500	08/09/2020	15/09/2020	7,00	500
			24/09/2020	44098,00	500
			07/10/2020	29,00	500
Instituição 13	20	24/09/2020	24/09/2020	0,00	20
Instituição 33	998	25/09/2020	07/10/2020	12,00	500
			20/10/2020	25,00	248
			19/11/2020	55,00	250
Instituição 34	500	25/09/2020	29/09/2020	4,00	500
Instituição 27	250	09/11/2020	09/11/2020	0,00	250
Instituição 34	2000	25/11/2020	25/11/2020	0,00	300
			08/12/2020	13,00	300
			11/12/2020	16,00	300
			04/01/2021	40,00	300
			15/01/2021	51,00	500
			22/02/2021	89,00	300
Instituição 7	26	18/02/2021	18/02/2021	0,00	26
Instituição 34	1810	18/02/2021	19/04/2021	60,00	1000
			07/05/2021	78,00	750
			03/05/2021	74,00	60
Total solicitado	16.219			Total entregue	16.219

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE C – Parâmetros do processo de entrega de matérias-primas e produtos acabados

Quadro 8.2 – Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de matérias-primas

FORNECEDORES	Distância até o AM-HUB (km)	Velocidades máxima e mínima no deslocamento (km/h)	Tempos máximo e mínimo de deslocamento (min)
Fornecedor A - Novo Hamburgo – RS	43,2	Máxima: 75 Mínima: 50	Máximo: 51,8 Mínimo: 34,6
Fornecedor B - Porto Alegre – RS	9,1	Máxima: 45 Mínima: 25	Máximo: 21,8 Mínimo: 12,1
Fornecedor C - Gravataí – RS	27	Máxima: 65 Mínima: 40	Máximo: 40,5 Mínimo: 24,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Quadro 8.3 – Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de *face shields*

DEMANDANTES	Distância máxima e mínima (km)	Velocidades máxima e mínima no deslocamento (km/h)	Tempos máximo e mínimo de deslocamento (min)
Campus Central - PUCRS	Máxima: 0,5 Mínima: 0,1	Máxima: 5 Mínima: 3	Máximo: 10 Mínimo: 1,2
Localizados até 30km do AM-HUB	Máxima: 20,9 Mínima: 1,8	Máxima: 45 Mínima: 25	Máximo: 50,2 Mínimo: 2,4
Localizados a mais de 30 km do AM-HUB	Máxima: 296 Mínima: 37,2	Máxima: 75 Mínima: 55	Máximo: 322,9 Mínimo: 29,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE D – Dados de tempo de transporte de matérias-primas e produtos acabados

Tabela 8.2 - Dados de tempos de entrega das matérias-primas e de entregas de *face shields*

Tempo de transporte do Fornecedor de PLA até o AM-HUB (min)	Tempo de transporte do Fornecedor de PETG até o AM-HUB (min)	Tempo de transporte do Fornecedor de fita elástica até o AM-HUB (min)	Tempo de transporte do AM-HUB até o Campus Central (min)	Tempo de transporte do AM-HUB até o demandante (< 30km) (min)	Tempo de transporte do AM-HUB até o demandante (> 30km) (min)
37,00	13,08	28,11	4,14	13,33	84,02
42,02	19,21	36,96	6,66	37,11	100,91
45,13	14,29	25,94	6,84	44,58	84,70
39,60	14,25	33,12	7,82	11,11	320,40
37,28	18,02	35,22	3,00	15,77	109,69
46,63	21,35	39,50	2,46	35,65	224,95
40,56	14,40	29,82	5,12	45,54	226,01
42,26	15,38	33,05	4,45	8,27	206,02
35,50	12,61	36,85	5,47	26,67	302,43
36,38	19,26	26,88	2,07	8,01	274,90
37,03	13,26	33,63	7,59	46,60	307,42
35,34	12,67	40,23	1,53	27,13	187,66
45,29	13,92	29,97	2,74	15,37	285,50
37,24	13,07	33,25	3,74	33,21	237,12
46,90	18,66	32,82	7,09	33,17	142,54
50,57	18,82	29,30	7,90	43,17	171,70
44,54	20,51	30,32	8,27	5,51	34,09
39,10	15,51	39,27	7,39	21,84	85,48
47,07	16,92	31,27	1,62	29,49	200,34
35,24	18,91	26,39	4,67	42,71	315,93

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE E – Distribuições de probabilidade dos tempos de entrega de matérias-primas e tempos de entrega de produtos

Quadro 8.4 – Distribuições de probabilidade dos tempos de entrega

VARIÁVEIS DE ENTRADA	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	NOTAÇÃO DO PROMODEL
Tempo de entrega do fornecedor de PLA	<i>Power Function</i>	B(0.507, 1.,35.2, 52)
Tempo de entrega do fornecedor de PETG	<i>Beta</i>	B(0.808, 1.26, 12.6, 21.4)
Tempo de entrega do fornecedor de fita elástica	<i>Lognormal</i>	10.1+L(22.5, 4.34)
Tempo de entrega de <i>face shield</i> no Campus Central	<i>Beta</i>	B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27)
Tempo de entrega de <i>face shield</i> até 30 km	<i>Beta</i>	B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6)
Tempo de entrega de <i>face shield</i> acima de 30 km	<i>Beta</i>	B(1.37, 0.982, 34.1, 320)

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Stat Fit (2024)

APÊNDICE F – Dados de tempo de preparação e produção no HUB-AM

Tabela 8.3 - Amostras de tempos das operações de preparação e produção (continua)

Tempos de troca de bobina de filamento (min)	Tempo de preparação computacional para impressão (min)	Tempos de aplicação e/ou substituição de adesivo (min)	"Start" de impressão - impressoras Cliever (min)	"Start" de impressão - outras impressoras (min)	Impressão de Peça Tipo 1 (min)	Limpeza e acabamento do lote de Peça Tipo 1 (min)	
Mínimo = 7 Máximo = 12	Mínimo = 10 Máximo = 15	Mínimo = 9 Máximo = 12	Mínimo = 30 Máximo = 40	Mínimo = 5 Máximo = 10	Mínimo = 300 Máximo = 360	Mínimo = 1 Máximo = 4	
7.71	10.60	10.68	37.26	9.62	308.38	1.32	
7.21	10.29	11.95	30.37	7.59	325.88	2.13	
10.11	10.94	9.98	31.75	6.36	336.73	3.24	
7.77	10.50	10.61	32.88	8.22	317.45	3.84	
10.58	13.38	10.52	36.69	8.22	309.34	2.33	
11.64	13.46	9.85	37.61	9.26	341.97	3.14	
9.89	14.33	10.04	38.03	5.33	320.78	2.73	
8.31	11.76	11.76	37.03	7.03	326.74	1.14	
10.62	12.48	10.22	30.48	7.83	303.14	2.58	
7.19	13.51	9.29	33.94	9.22	306.19	2.07	
7.50	11.03	10.00	32.29	5.93	308.47	2.43	
10.66	13.87	10.86	37.26	6.21	302.58	3.93	
8.13	10.33	10.92	38.82	5.94	337.30	3.04	
8.11	12.64	11.26	31.82	9.96	309.22	3.10	
10.05	13.31	9.61	32.80	6.36	342.91	1.08	
11.77	14.68	9.43	36.96	8.33	355.70	1.04	
8.18	11.58	10.34	39.03	8.35	334.69	3.35	
8.69	12.61	10.11	31.23	8.01	315.71	3.66	
7.26	13.83	10.46	35.08	9.65	343.49	2.60	
10.69	10.64	9.30	31.17	9.18	302.23	1.59	
Média	9.10	12.29	10.36	34.63	7.83	322.45	2.52

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8.3 - Amostras de tempos das operações de preparação e produção (conclusão)

Impressão de Peça Tipo 2 (min)	Ajustes folha de PETG (min)	Setup da máquina de corte (min)	Carregamento e "start" da máquina de corte (min)	Operação da máquina de corte (min)	Montagem e inspeção final do face shield (min)	
Mínimo = 300 Máximo = 420	Mínimo = 4 Máximo = 7	Mínimo = 1,8 Máximo = 2,2	Mínimo = 0,85 Máximo = 1,1	Mínimo = 6 Máximo = 9	Mínimo = 0,65 Máximo = 0,9	
312.07	4.09	2.13	1.09	6.04	0.66	
387.92	5.51	2.13	0.96	8.19	0.83	
327.05	4.12	2.05	1.07	7.81	0.69	
326.57	4.09	1.94	1.04	8.92	0.68	
373.21	4.13	2.17	1.04	8.28	0.82	
414.48	6.68	1.89	0.96	7.34	0.66	
328.43	5.97	2.13	0.90	7.44	0.83	
340.62	4.02	1.91	0.91	7.40	0.72	
306.34	4.20	1.84	0.89	8.23	0.71	
388.60	4.12	1.86	1.03	7.62	0.69	
314.38	4.01	1.95	0.95	8.01	0.71	
307.07	4.66	1.90	1.05	8.79	0.78	
322.56	4.58	1.90	0.90	6.38	0.87	
311.95	6.85	2.16	1.09	8.25	0.67	
381.10	6.02	2.01	1.07	6.58	0.85	
383.12	5.67	1.97	0.97	6.14	0.87	
404.01	5.72	1.87	1.01	7.15	0.81	
342.15	4.29	2.17	1.04	6.91	0.76	
359.57	4.64	1.80	1.01	7.21	0.71	
384.24	6.79	1.97	0.90	8.70	0.86	
Média	350.77	5.01	1.99	0.99	7.57	0.76

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE G – Distribuições de probabilidade dos tempos de preparação e produção do HUB-AM

Quadro 8.5 – Distribuições de probabilidade dos tempos de preparação e produção

VARIÁVEIS DE ENTRADA	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	NOTAÇÃO DO PROMODEL
Tempo de troca de bobinas de filamentos	<i>Beta</i>	B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8)
Tempo de preparação computacional para impressão	<i>Gamma</i>	-804+G(2.38e+005, 0.00343)
Tempo de aplicação/substituição de adesivo	<i>Loglogistic</i>	1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3)
Tempo de "start" de impressão para impressoras da marca Cliever	<i>Beta</i>	B(0.859, 0.914, 30.4, 39)
Tempo de "start" em impressoras que são não são da marca Cliever	<i>Johnson SB</i>	5.27+4.72*(1./((1.+EXP(-(N(0.,1.)--0.133)/0.512))))
Tempo de limpeza e acabamento da Peça do Tipo 1	<i>Weibull</i>	-2.05+W(6, 4.93)
Tempo de impressão da Peça do Tipo 1	<i>Power Function</i>	B(0.507, 1.,302, 361)
Tempo de impressão da Peça do Tipo 2	<i>Beta</i>	B(0.802, 1.25, 306, 414)
Tempo de ajuste da Folha de PETG	<i>Beta</i>	B(0.489, 0.873, 4.01, 6.85)
Tempo de <i>setup</i> da máquina de corte	<i>Inverse Gaussian</i>	1.65+IG(2.45, 0.34)
Tempo de carregamento e "start" da máquina de corte	<i>Weibull</i>	W(17.6, 1.02)
Tempo de operação da máquina de corte	<i>Beta</i>	B(1.38, 1.24, 6.04, 8.92)
Tempo de montagem e inspeção final	<i>Beta</i>	B(0.97, 1.08, 0.66, 0.87)

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Stat Fit (2024)

APÊNDICE H – Coordenadas das localizações dos demandantes de face shields

Quadro 8.6 – Coordenadas dos demandantes

Demandante	Coordenada X	Coordenada Y	Demandante	Coordenada X	Coordenada Y
Instituição 1	62	30	Instituição 24	55	20
Instituição 2	55	5	Instituição 25	450	100
Instituição 3	40	48	Instituição 26	53	45
Instituição 4	105	55	Instituição 27	55	47
Instituição 5	78	35	Instituição 28	78	36
Instituição 6	42	54	Instituição 29	90	200
Instituição 7	54	50	Instituição 30	85	35
Instituição 8	52	41	Instituição 31	55	65
Instituição 9	87	55	Instituição 32	-1000	210
Instituição 10	5	75	Instituição 33	130	30
Instituição 11	44	50	Instituição 34	70	36
Instituição 12	55	35	Instituição 35	70	38
Instituição 13	120	30	Instituição 36	71	37
Instituição 14	70	60	Instituição 37	52	30
Instituição 15	100	10	Instituição 38	72	47
Instituição 16	70	58	Instituição 39	500	90
Instituição 17	42	32	Instituição 40	55	45
Instituição 18	78	63	Instituição 41	50	42
Instituição 19	53	50	Instituição 42	52	45
Instituição 20	52	53	Instituição 43	42	53
Instituição 21	54	57	Instituição 44	65	20
Instituição 22	78	60	Instituição 45	50	20
Instituição 23	50	45	Instituição 46	90	80

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

APÊNDICE I – Resultados do cenário de clusterização K=5

Quadro 8.7 – Clusters para K=5

Demandante	Coordenada X	Coordenada Y	Cluster
Instituição 29	90	200	1
Instituição 34	70	36	2
Instituição 36	71	37	
Instituição 28	78	36	
Instituição 35	70	38	
Instituição 5	78	35	
Instituição 30	85	35	
Instituição 38	72	47	
Instituição 16	70	58	
Instituição 14	70	60	
Instituição 22	78	60	
Instituição 9	87	55	
Instituição 18	78	63	
Instituição 4	105	55	
Instituição 15	100	10	
Instituição 13	120	30	
Instituição 46	90	80	
Instituição 33	130	30	
Instituição 25	450	100	
Instituição 39	500	90	4
Instituição 1	62	30	
Instituição 12	55	35	
Instituição 40	55	45	
Instituição 26	53	45	
Instituição 37	52	30	
Instituição 27	55	47	
Instituição 42	52	45	
Instituição 41	50	42	
Instituição 44	65	20	
Instituição 24	55	20	
Instituição 23	50	45	
Instituição 19	53	50	
Instituição 7	54	50	
Instituição 45	50	20	
Instituição 20	52	53	
Instituição 21	54	57	
Instituição 11	44	50	
Instituição 3	40	48	
Instituição 31	55	65	
Instituição 8	52	41	
Instituição 6	42	54	
Instituição 43	42	53	
Instituição 17	42	32	
Instituição 2	55	5	
Instituição 10	5	75	
Instituição 32	-1000	210	5

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do *software* SPSS versão 17.0 (2024)

Final Cluster Centers					
	Cluster				
	1	2	3	4	5
COORDENADA X	90,00	85,41	475,00	49,76	-1000,00
COORDENADA Y	200,00	45,00	95,00	42,28	210,00

Figura 8.1 – Localização dos centros dos *Clusters* para K=5

Fonte: *software* SPSS versão 17.0

APÊNDICE J – Cenário de clusterização K = 5

Quadro 8.8 – Distância dos produtores AM até demandantes dos *cluster* K=5

Demandante	Coordenada X	Coordenada Y	Cluster	Coordenada X Centroide	Coordenada Y Centroide	Produtor AM	Coordenada X Produtor AM	Coordenada Y Produtor AM	Distância Demandante - Produtor AM (km)
Instituição 29	90	200	1	90	200	UNITEC - UNISINOS	80	190	4,3
Instituição 34	70	36	2	85,41	45	IDEIA - PUCRS	71	36	0,1
Instituição 36	71	37							1,8
Instituição 28	78	36							1,9
Instituição 35	70	38							2,1
Instituição 5	78	35							2,3
Instituição 30	85	35							3,2
Instituição 38	72	47							3,3
Instituição 16	70	58							5,9
Instituição 14	70	60							6,6
Instituição 22	78	60							6,7
Instituição 9	87	55							6,8
Instituição 18	78	63							7,3
Instituição 4	105	55							10,4
Instituição 15	100	10							10,6
Instituição 13	120	30	11,5						
Instituição 46	90	80	12,1						
Instituição 33	130	30	14,6						
Instituição 25	450	100	3	475	95	UFRGS - CAMPUS LITORAL NORTE	475	93	12
Instituição 39	500	90	4	49,76	42,28	LIFEELAB - UFRGS - CAMPUS CENTRAL	47	50	11,8
Instituição 1	62	30							8,5
Instituição 12	55	35							4,2
Instituição 40	55	45							4,7
Instituição 26	53	45							8
Instituição 37	52	30							6,6
Instituição 27	55	47							3,9
Instituição 42	52	45							3,5
Instituição 41	50	42							4,6
Instituição 44	65	20							8,6
Instituição 24	55	20							8,5
Instituição 23	50	45							3,1
Instituição 19	53	50							1,7
Instituição 7	54	50							2,5
Instituição 45	50	20							8,5
Instituição 20	52	53							1,2
Instituição 21	54	57							1,9
Instituição 11	44	50							2,1
Instituição 3	40	48							2,9
Instituição 31	55	65							4
Instituição 8	52	41							3
Instituição 6	42	54							2,4
Instituição 43	42	53							2,3
Instituição 17	42	32	5,1						
Instituição 2	55	5	13,5						
Instituição 10	5	75	15,4						
Instituição 32	-1000	210	5	-1000	210	LPST - UFSM	-950	208	10,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE K – Parâmetros do processo de entrega de produtos acabados no cenário AM-CLUSTER (K=5)

Quadro 8.9 – Distâncias, velocidades e tempos considerados para entregas de *face shields*

DEMANDANTES	Distância máxima e mínima (km)	Velocidades máxima e mínima no deslocamento (km/h)	Tempos máximo e mínimo de deslocamento (min)
Cluster 1	Máxima: 4.6 Mínima: 4.3	Máxima: 45 Mínima: 25	Máximo: 10.3 Mínimo: 5.7
Cluster 2	Máxima: 14.6 Mínima: 0,1	Máxima: 45 Mínima: 3	Máximo: 19.5 Mínimo: 2
Cluster 3	Máxima: 12 Mínima: 11.8	Máxima: 75 Mínima: 55	Máximo: 12,9 Mínimo: 9,6
Cluster 4	Máxima: 15.4 Mínima: 1.2	Máxima: 45 Mínima: 25	Máximo: 20.5 Mínimo: 2.9
Cluster 5	Máxima: 11.2 Mínima: 10.6	Máxima: 75 Mínima: 55	Máximo: 11.6 Mínimo: 9.8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

APÊNDICE L – Dados de tempo de transporte de face shields nos clusters (K=5)

Tabela 8.4 - Dados de tempos de entrega de *face shields* nos *clusters*

Tempo de deslocamento entre AM-CLUSTER 1 e demandantes (min)	Tempo de deslocamento entre AM-CLUSTER 2 e demandantes (min)	Tempo de deslocamento entre AM-CLUSTER 3 e demandantes (min)	Tempo de deslocamento entre AM-CLUSTER 4 e demandantes (min)	Tempo de deslocamento entre AM-CLUSTER 5 e demandantes (min)
5,7	2,0	9,6	2,9	9,8
7,6	4,3	12,9	4,1	10,6
8,9	4,6	9,9	4,6	9,9
9,9	5,0	9,9	5,0	9,8
9,6	5,5	10,5	5,5	10,1
9,6	5,5	10,3	5,8	10,4
8,5	5,7	10,6	6,0	10,1
6,3	10,1	10,7	7,0	9,9
6,0	11,3	10,1	5,1	10,6
8,7	11,5	10,0	5,3	10,3
8,8	11,7	10,0	6,0	9,9
7,8	12,5	9,6	6,7	10,1
6,1	13,9	10,3	6,9	10,5
10,2	14,1	10,1	7,2	10,6
10,0	15,3	10,4	7,9	10,3
9,3	16,1	10,8	8,1	10,1
6,8	19,5	10,7	8,7	10,6
5,8	9,1	9,9	11,3	10,5
8,6	4,7	10,3	13,7	9,9
9,7	9,5	10,6	14,6	10,3
10,2	11,1	10,1	14,6	10,2
6,1	10,2	10,5	14,6	10,2
7,3	2,1	10,3	14,7	9,9
8,8	11,3	9,8	18,0	10,0
6,9	4,1	10,8	20,5	9,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

APÊNDICE M – Distribuições de probabilidade dos tempos de transporte do cenário AM-CLUSTER

Quadro 8.10 – Distribuições de probabilidade dos tempos de transporte (AM-CLUSTER)

VARIÁVEIS DE ENTRADA	DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE	NOTAÇÃO DO PROMODEL
Tempo de transporte de <i>face shields</i> no Cluster 1	<i>Triangular</i>	$T(4, 10.1, 10.3)$
Tempo de transporte de <i>face shields</i> no Cluster 2	<i>Weibull</i>	$0.861+W(1.87, 9.41)$
Tempo de transporte de <i>face shields</i> no Cluster 3	<i>Pearson 5</i>	$8.93+P5(8.13, 10.1)$
Tempo de transporte de <i>face shields</i> no Cluster 4	<i>Loglogistic</i>	$2.2+5.3*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))^{**}(1./2.33)$
Tempo de transporte de <i>face shields</i> no Cluster 5	<i>Loglogistic</i>	$2.39+7.77*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))^{**}(1./46.7)$

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Stat Fit (2024)

APÊNDICE N – Modelo conceitual da configuração AM-HUB

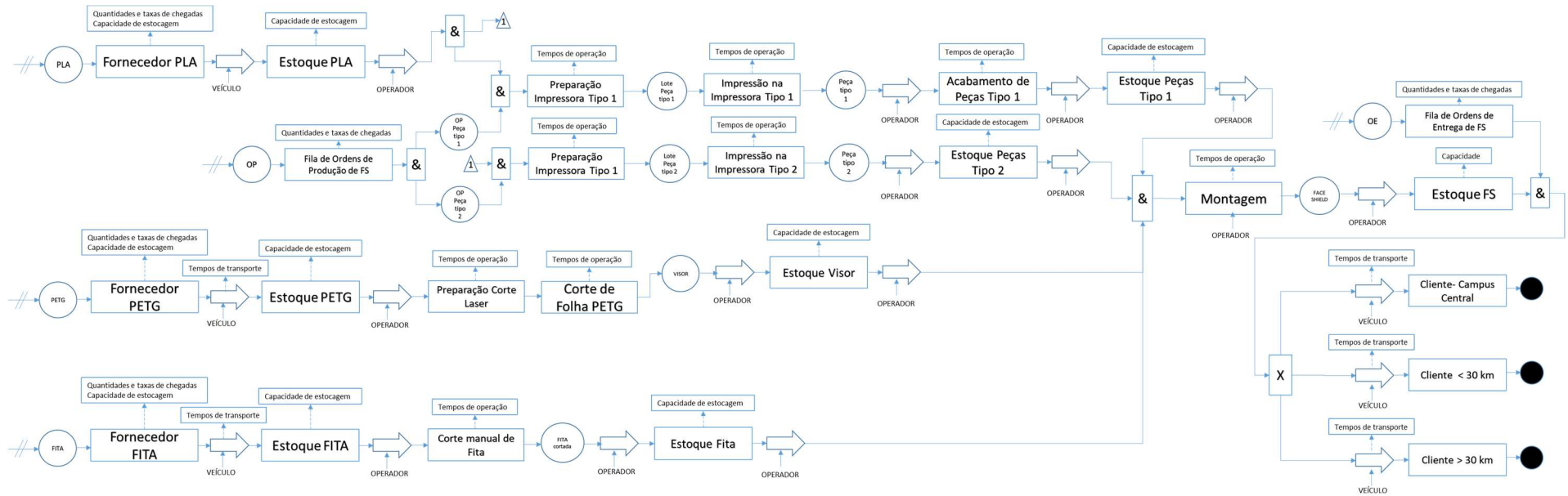


Figura 8.2 – Modelo conceitual da configuração AM-HUB

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

APÊNDICE O – Modelo computacional da configuração AM-HUB

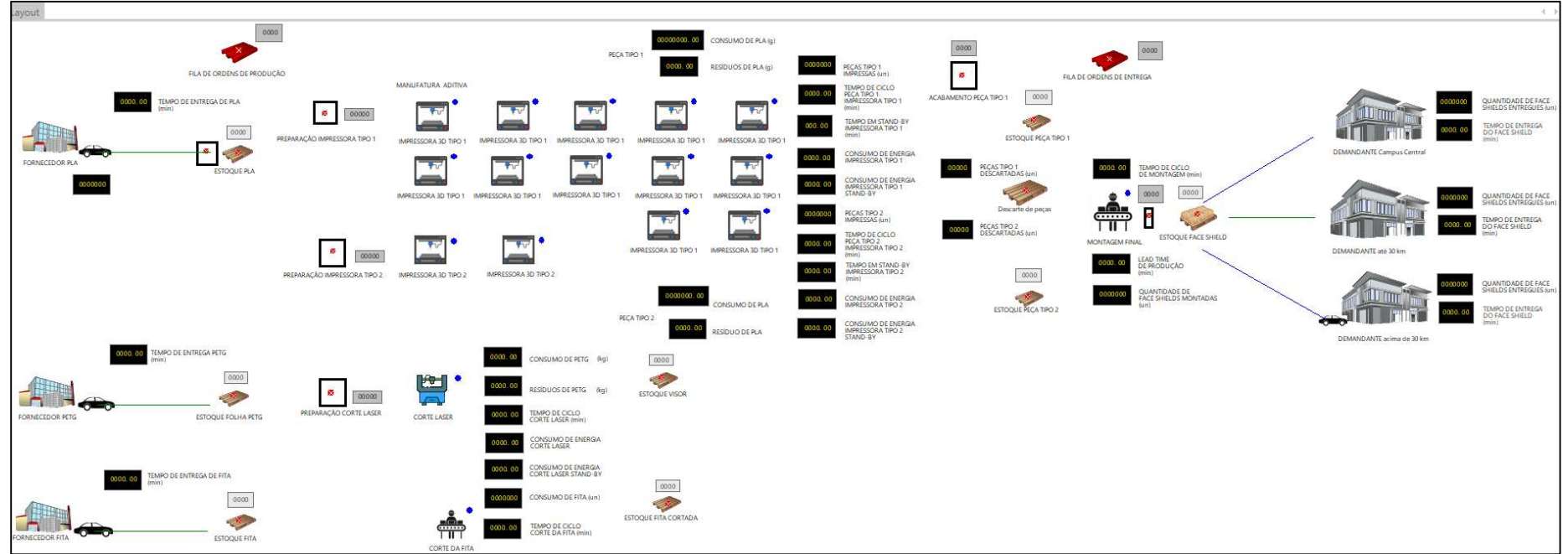


Figura 8.3 – Layout do modelo computacional do sistema AM-HUB
Fonte: Elaborada pelo autor com uso do software ProModel for Windows (2024)

APÊNDICE P – Resultados dos cálculos de precisão para 10 e 40 replicações de simulação

Tabela 8.5 – Precisões obtidas no modelo de simulação para 10 replicações

Variável	Valor da variável no sistema real	Valor médio gerado na simulação	Precisão do modelo de simulação	Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real
TEMPO DE ENTREGA PLA	48,5 min	45,81 min	2,74 min	5,66%
TEMPO DE ENTREGA PETG	18,5 min	18,55 min	0,95 min	5,13%
TEMPO DE ENTREGA FITA ELÁSTICA	33 min	31,88 min	2,09 min	6,34%
TEMPO IMPRESSORA TIPO 1 EM STAND-BY	7,45 min	7,83 min	0,47 min	6,35%
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 1 IMPRESSORA TIPO 1	320 min	322,43 min	4,62 min	1,44%
TEMPO IMPRESSORA TIPO 2 EM STAND-BY	35 min	34,41 min	0,67 min	1,90%
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 2 IMPRESSORA TIPO 2	350 min	350,13 min	7,36 min	2,10%
TEMPO DE CICLO CORTE LASER	10 min	10,18 min	0,47 min	4,72%
TEMPO DE CICLO MONTAGEM	0,75 min	0,76 min	0,016 min	2,24%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS MONTADAS	16.219 unidades	16.225 unidade	5,67 unidades	0,03%
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIEL Campus Central	5 min	4,2 min	0,73 min	14,63%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES Campus Central	7.457 unidades	7.347,6 unidades	221,49 unidades	2,97%
TEMPO DE ENTREGA DO FACE SHIELD até 30 km	27,21 min	25,92 min	3,77 min	13,84%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES até 30 km	8.637 unidades	8.691,8 unidades	250,67 unidades	2,90%
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIELD acima de 30 km	195,1 min	162,68 min	38,56 min	19,77%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES acima de 30 km	125 unidades	158,6 min	62,28 unidades	49,83%

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.6 – Precisões obtidas no modelo de simulação para 40 replicações

Variável	Valor da variável no sistema real	Valor médio gerado na simulação	Precisão do modelo de simulação	Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real
TEMPO DE ENTREGA PLA	48,5 min	47,61 min	0,91 min	1,87%
TEMPO DE ENTREGA PETG	18,5 min	18 min	0,52 min	2,80%
TEMPO DE ENTREGA FITA ELÁSTICA	33 min	32,87	0,95 min	2,87%
TEMPO IMPRESSORA TIPO 1 EM STAND-BY	7,45 min	7,93 min	0,62 min	8,26%
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 1 IMPRESSORA TIPO 1	320 min	321,89 min	1,91 min	0,60%
TEMPO IMPRESSORA TIPO 2 EM STAND-BY	35 min	34,67 min	1,11 min	3,16%
TEMPO DE CICLO PEÇA TIPO 2 IMPRESSORA TIPO 2	350 min	348,2 min	3,64 min	1,04%
TEMPO DE CICLO CORTE LASER	10 min	10,22 min	0,36 min	3,60%
TEMPO DE CICLO MONTAGEM	0,75 min	0,76 min	0,01 min	0,90%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS MONTADAS	16.219 unidades	16.221,53 unidades	4,11 unidades	0,03%
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIEL Campus Central	5 min	4,82 min	0,25 min	5,07%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES Campus Central	7.457 unidades	7558,85 unidades	139,20 unidades	1,87%
TEMPO DE ENTREGA DO FACE SHIELD até 30 km	27,21 min	27,13 min	1,34 min	4,94%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES até 30 km	8.637 unidades	8.574,70 unidades	140,63 unidades	1,63%
TEMPO DE ENTREGA DE FACE SHIELD acima de 30 km	195,1 min	178,41 min	18,08 min	9,27%
QUANTIDADE DE FACE SHIELDS ENTREGUES acima de 30 km	125 unidades	116,21 unidades	15,95 unidades	12,76%

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

APÊNDICE Q – Variabilidade nos resultados das replicações da simulação

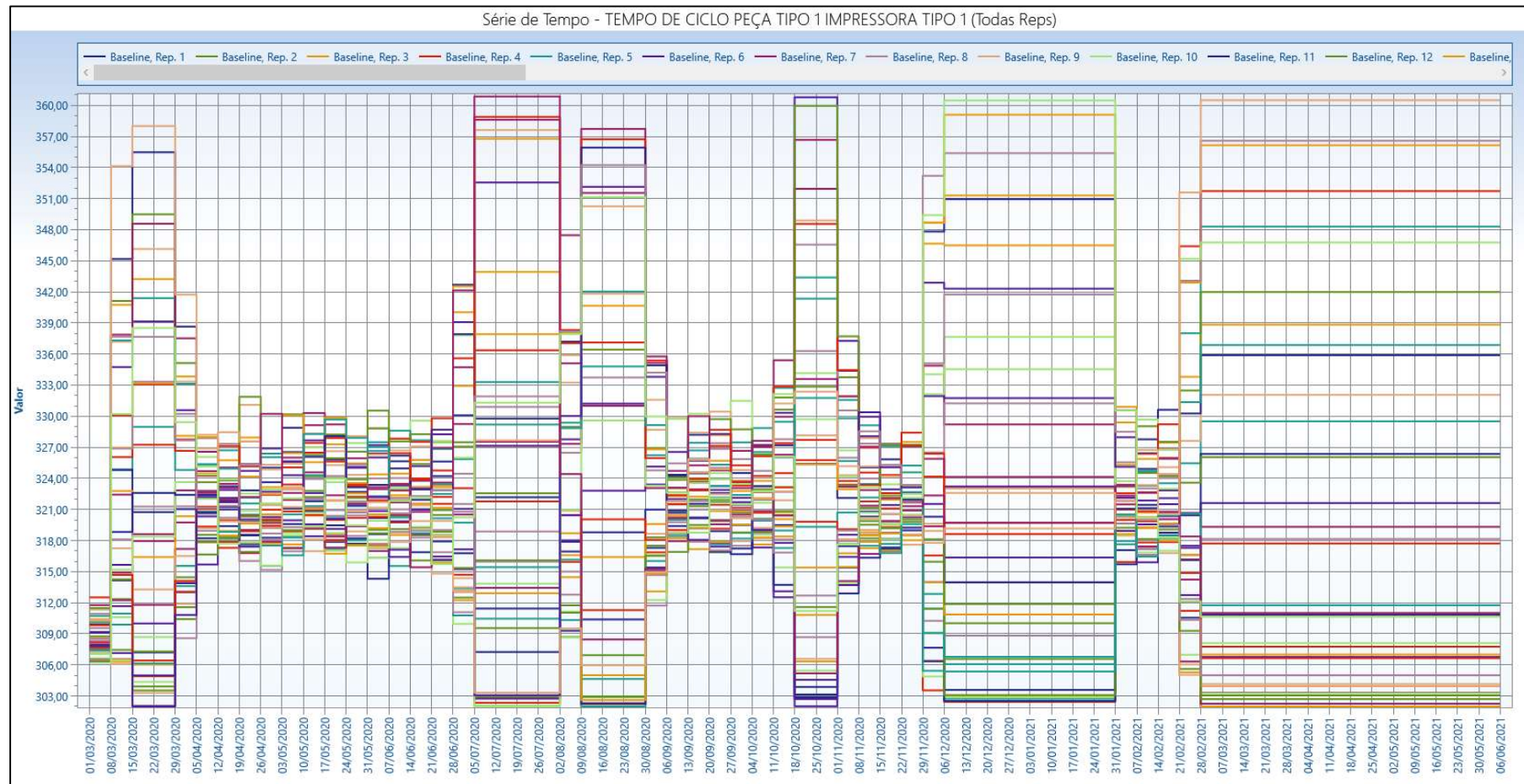


Figura 8.4 - Resultados das 40 replicações para Tempo de ciclo da impressora tipo 1

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do *software ProModel for Windows (2024)*

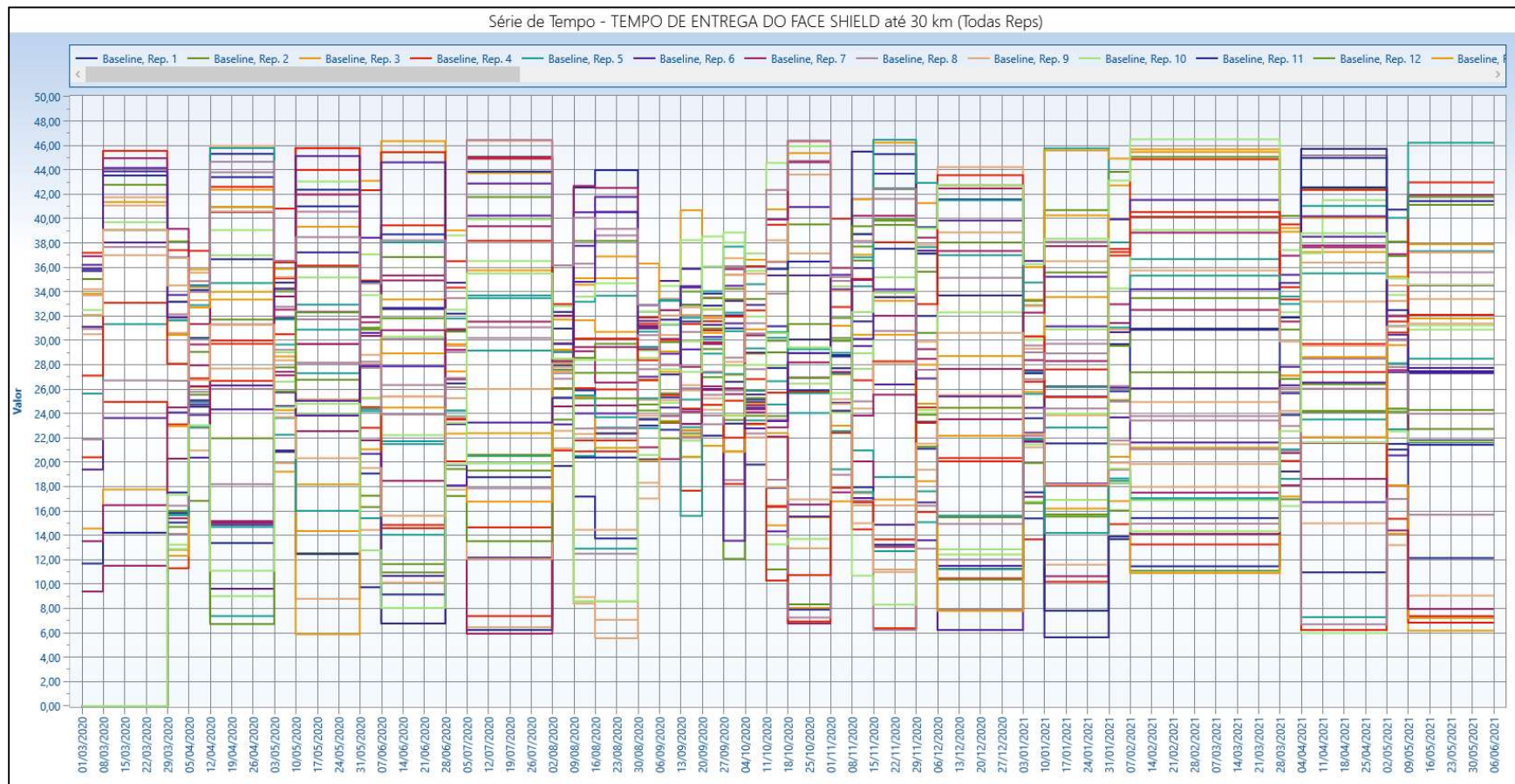


Figura 8.5 - Resultados das 40 replicações para Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do software ProModel for Windows (2024)

APÊNDICE R – Resultados da validação do modelo computacional

Tabela 8.7 – Validação do modelo para a variável 'Tempo de entrega de PLA'

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	48,5	46,80	1,70
2	48,5	47,45	1,05
3	48,5	45,39	3,11
4	48,5	45,21	3,29
5	48,5	51,37	-2,87
6	48,5	48,57	-0,07
7	48,5	48,04	0,46
8	48,5	51,18	-2,68
9	48,5	45,43	3,07
10	48,5	47,02	1,48
11	48,5	46,35	2,15
12	48,5	45,07	3,43
13	48,5	48,40	0,10
14	48,5	47,20	1,30
15	48,5	47,95	0,55
16	48,5	47,13	1,37
17	48,5	45,24	3,26
18	48,5	50,24	-1,74
19	48,5	42,40	6,10
20	48,5	50,12	-1,62
21	48,5	50,65	-2,15
22	48,5	47,67	0,83
23	48,5	46,76	1,74
24	48,5	45,84	2,66
25	48,5	45,23	3,27
26	48,5	46,05	2,45
27	48,5	47,22	1,28
28	48,5	44,63	3,87
29	48,5	47,39	1,11
30	48,5	48,69	-0,19
31	48,5	50,88	-2,38
32	48,5	49,30	-0,80
33	48,5	50,63	-2,13
34	48,5	45,64	2,86
35	48,5	47,11	1,39
36	48,5	48,99	-0,49
37	48,5	49,82	-1,32
38	48,5	47,40	1,10
39	48,5	47,22	1,28
40	48,5	50,86	-2,36
Média (min)		47,61	0,89
Desvio-padrão (min)		2,12	2,12
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,91	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		1,87%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,79 -0,02

OBS: Limite superior igual a 1,79 e inferior igual a -0,02, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.8 – Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de PETG’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	18,5	18,19	0,31
2	18,5	17,54	0,96
3	18,5	16,06	2,44
4	18,5	17,44	1,06
5	18,5	18,86	-0,36
6	18,5	18,57	-0,07
7	18,5	16,54	1,96
8	18,5	17,89	0,61
9	18,5	20,08	-1,58
10	18,5	18,98	-0,48
11	18,5	19,72	-1,22
12	18,5	17,43	1,07
13	18,5	18,49	0,01
14	18,5	17,09	1,41
15	18,5	19,02	-0,52
16	18,5	18,70	-0,20
17	18,5	16,59	1,91
18	18,5	16,53	1,97
19	18,5	19,57	-1,07
20	18,5	16,99	1,51
21	18,5	20,04	-1,54
22	18,5	16,98	1,52
23	18,5	17,60	0,90
24	18,5	16,22	2,28
25	18,5	19,95	-1,45
26	18,5	19,86	-1,36
27	18,5	17,27	1,23
28	18,5	19,80	-1,30
29	18,5	18,55	-0,05
30	18,5	18,06	0,44
31	18,5	16,55	1,95
32	18,5	16,93	1,57
33	18,5	17,71	0,79
34	18,5	17,76	0,74
35	18,5	17,18	1,32
36	18,5	16,11	2,39
37	18,5	17,17	1,33
38	18,5	17,85	0,65
39	18,5	18,82	-0,32
40	18,5	19,31	-0,81
Média (min)		18,00	0,50
Desvio-padrão (min)		1,21	1,21
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,52	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		2,80%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,02 -0,02

OBS: Limite superior igual a 1,02 e inferior igual a -0,02, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
 Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.9 – Validação do modelo para ‘Tempo de Entrega de Fita Elástica’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	33	33,67	-0,67
2	33	32,40	0,60
3	33	31,64	1,36
4	33	33,44	-0,44
5	33	32,68	0,32
6	33	35,51	-2,51
7	33	32,19	0,81
8	33	29,49	3,51
9	33	36,50	-3,50
10	33	30,23	2,77
11	33	30,38	2,62
12	33	30,59	2,41
13	33	32,45	0,55
14	33	33,39	-0,39
15	33	39,60	-6,60
16	33	35,83	-2,83
17	33	32,03	0,97
18	33	32,65	0,35
19	33	34,40	-1,40
20	33	33,45	-0,45
21	33	30,17	2,83
22	33	36,44	-3,44
23	33	35,59	-2,59
24	33	29,25	3,75
25	33	33,35	-0,35
26	33	30,67	2,33
27	33	31,57	1,43
28	33	30,26	2,74
29	33	34,79	-1,79
30	33	32,26	0,74
31	33	31,60	1,40
32	33	31,65	1,35
33	33	34,24	-1,24
34	33	34,54	-1,54
35	33	32,48	0,52
36	33	31,88	1,12
37	33	30,11	2,89
38	33	32,81	0,19
39	33	34,96	-1,96
40	33	33,75	-0,75
Média (min)		32,87	0,13
Desvio-padrão (min)		2,21	2,21
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,95	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		2,87%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,08 -0,82

OBS: Limite superior igual a 1,79 e inferior igual a -0,02, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.10 – Validação do modelo para ‘Tempo da impressora tipo 1 em *stand-by*’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	7,45	9,15	-1,70
2	7,45	9,86	-2,41
3	7,45	6,50	0,95
4	7,45	9,83	-2,38
5	7,45	7,70	-0,25
6	7,45	6,62	0,83
7	7,45	9,33	-1,88
8	7,45	9,32	-1,87
9	7,45	5,74	1,71
10	7,45	8,98	-1,53
11	7,45	7,78	-0,33
12	7,45	9,01	-1,56
13	7,45	9,74	-2,29
14	7,45	9,84	-2,39
15	7,45	9,84	-2,39
16	7,45	9,56	-2,11
17	7,45	5,94	1,51
18	7,45	7,95	-0,50
19	7,45	7,77	-0,32
20	7,45	6,75	0,70
21	7,45	6,03	1,42
22	7,45	8,49	-1,04
23	7,45	8,22	-0,77
24	7,45	6,25	1,20
25	7,45	8,24	-0,79
26	7,45	7,82	-0,37
27	7,45	6,01	1,44
28	7,45	9,03	-1,58
29	7,45	6,82	0,63
30	7,45	9,67	-2,22
31	7,45	6,22	1,23
32	7,45	8,49	-1,04
33	7,45	5,72	1,73
34	7,45	8,86	-1,41
35	7,45	7,97	-0,52
36	7,45	7,32	0,13
37	7,45	8,51	-1,06
38	7,45	5,38	2,07
39	7,45	5,74	1,71
40	7,45	9,02	-1,57
Média (min)		7,93	-0,48
Desvio-padrão (min)		1,44	1,44
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,62	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		8,26%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		0,14 -1,09

OBS: Limite superior igual a 0,14 e inferior igual a -1,09, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
 Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.11 – Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da impressora tipo 1’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	320	319,08	0,92
2	320	317,14	2,86
3	320	329,10	-9,10
4	320	317,31	2,69
5	320	319,14	0,86
6	320	327,81	-7,81
7	320	325,09	-5,09
8	320	317,68	2,32
9	320	325,27	-5,27
10	320	314,82	5,18
11	320	321,96	-1,96
12	320	317,41	2,59
13	320	326,15	-6,15
14	320	322,02	-2,02
15	320	327,72	-7,72
16	320	317,60	2,40
17	320	323,32	-3,32
18	320	320,90	-0,90
19	320	318,17	1,83
20	320	315,28	4,72
21	320	323,34	-3,34
22	320	321,39	-1,39
23	320	325,58	-5,58
24	320	328,34	-8,34
25	320	321,31	-1,31
26	320	316,53	3,47
27	320	318,02	1,98
28	320	330,66	-10,66
29	320	319,83	0,17
30	320	328,41	-8,41
31	320	315,90	4,10
32	320	317,57	2,43
33	320	321,86	-1,86
34	320	320,99	-0,99
35	320	319,51	0,49
36	320	319,62	0,38
37	320	322,12	-2,12
38	320	325,27	-5,27
39	320	329,63	-9,63
40	320	326,89	-6,89
Média (min)		321,89	-1,89
Desvio-padrão (min)		4,46	4,46
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	1,91	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		0,60%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		0,02 -3,80

OBS: Limite superior igual a 0,02 e inferior igual a -3,80, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.12 – Validação do modelo para ‘Tempo da impressora tipo 2 em *stand-by*’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	35	31,24	3,76
2	35	37,58	-2,58
3	35	32,44	2,56
4	35	33,49	1,51
5	35	34,18	0,82
6	35	35,93	-0,93
7	35	34,58	0,42
8	35	38,27	-3,27
9	35	33,36	1,64
10	35	33,94	1,06
11	35	37,20	-2,20
12	35	37,06	-2,06
13	35	38,67	-3,67
14	35	37,73	-2,73
15	35	30,64	4,36
16	35	37,05	-2,05
17	35	31,13	3,87
18	35	37,93	-2,93
19	35	36,41	-1,41
20	35	35,32	-0,32
21	35	35,84	-0,84
22	35	37,68	-2,68
23	35	32,45	2,55
24	35	37,12	-2,12
25	35	31,47	3,53
26	35	35,47	-0,47
27	35	30,92	4,08
28	35	36,05	-1,05
29	35	30,90	4,10
30	35	30,64	4,36
31	35	31,62	3,38
32	35	38,77	-3,77
33	35	34,75	0,25
34	35	31,92	3,08
35	35	34,56	0,44
36	35	32,70	2,30
37	35	36,36	-1,36
38	35	37,23	-2,23
39	35	33,31	1,69
40	35	32,73	2,27
Média (min)		34,67	0,33
Desvio-padrão (min)		2,59	2,59
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	1,11	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		3,16%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,44 -0,77

OBS: Limite superior igual a 1,44 e inferior igual a -0,77, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.13 – Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da impressora tipo 2’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	350	355,58	-5,58
2	350	338,06	11,94
3	350	339,57	10,43
4	350	344,29	5,71
5	350	342,12	7,88
6	350	357,96	-7,96
7	350	349,30	0,70
8	350	358,89	-8,89
9	350	340,87	9,13
10	350	352,17	-2,17
11	350	344,55	5,45
12	350	353,70	-3,70
13	350	347,66	2,34
14	350	347,33	2,67
15	350	342,92	7,08
16	350	352,71	-2,71
17	350	346,56	3,44
18	350	343,65	6,35
19	350	339,70	10,30
20	350	360,90	-10,90
21	350	345,52	4,48
22	350	334,62	15,38
23	350	365,48	-15,48
24	350	362,00	-12,00
25	350	341,94	8,06
26	350	339,43	10,57
27	350	332,40	17,60
28	350	346,85	3,15
29	350	353,68	-3,68
30	350	354,18	-4,18
31	350	345,58	4,42
32	350	340,84	9,16
33	350	345,81	4,19
34	350	340,31	9,69
35	350	351,54	-1,54
36	350	357,24	-7,24
37	350	342,56	7,44
38	350	341,90	8,10
39	350	362,01	-12,01
40	350	365,49	-15,49
Média (min)		348,20	1,80
Desvio-padrão (min)		8,49	8,49
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	3,64	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		1,04%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		5,44 -1,83

OBS: Limite superior igual a 5,44 e inferior igual a -1,83, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.14 – Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo da Corte Laser’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	10	11,65	-1,65
2	10	10,60	-0,60
3	10	10,21	-0,21
4	10	11,48	-1,48
5	10	11,52	-1,52
6	10	9,56	0,44
7	10	9,52	0,48
8	10	9,72	0,28
9	10	10,16	-0,16
10	10	9,56	0,44
11	10	9,42	0,58
12	10	9,02	0,98
13	10	10,08	-0,08
14	10	10,59	-0,59
15	10	9,26	0,74
16	10	10,50	-0,50
17	10	11,70	-1,70
18	10	9,57	0,43
19	10	10,55	-0,55
20	10	10,84	-0,84
21	10	9,98	0,02
22	10	11,01	-1,01
23	10	10,92	-0,92
24	10	10,56	-0,56
25	10	9,11	0,89
26	10	9,12	0,88
27	10	10,72	-0,72
28	10	9,45	0,55
29	10	9,13	0,87
30	10	9,39	0,61
31	10	11,57	-1,57
32	10	10,89	-0,89
33	10	10,71	-0,71
34	10	9,89	0,11
35	10	9,45	0,55
36	10	9,32	0,68
37	10	9,12	0,88
38	10	10,85	-0,85
39	10	11,68	-1,68
40	10	10,36	-0,36
Média (min)		10,22	-0,22
Desvio-padrão (min)		0,84	0,84
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,36	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		3,60%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		0,14 -0,58

OBS: Limite superior igual a 0,14 e inferior igual a -0,58, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
 Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.15 – Validação do modelo para ‘Tempo de ciclo de Montagem’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	0,75	0,75	0,00
2	0,75	0,74	0,01
3	0,75	0,78	-0,03
4	0,75	0,77	-0,02
5	0,75	0,76	-0,01
6	0,75	0,74	0,01
7	0,75	0,76	-0,01
8	0,75	0,74	0,01
9	0,75	0,74	0,01
10	0,75	0,76	-0,01
11	0,75	0,76	-0,01
12	0,75	0,75	0,00
13	0,75	0,78	-0,03
14	0,75	0,74	0,01
15	0,75	0,75	0,00
16	0,75	0,75	0,00
17	0,75	0,78	-0,03
18	0,75	0,76	-0,01
19	0,75	0,75	0,00
20	0,75	0,77	-0,02
21	0,75	0,74	0,01
22	0,75	0,76	-0,01
23	0,75	0,77	-0,02
24	0,75	0,78	-0,03
25	0,75	0,74	0,01
26	0,75	0,76	-0,01
27	0,75	0,78	-0,03
28	0,75	0,75	0,00
29	0,75	0,76	-0,01
30	0,75	0,76	-0,01
31	0,75	0,74	0,01
32	0,75	0,76	-0,01
33	0,75	0,74	0,01
34	0,75	0,78	-0,03
35	0,75	0,78	-0,03
36	0,75	0,77	-0,02
37	0,75	0,74	0,01
38	0,75	0,79	-0,04
39	0,75	0,74	0,01
40	0,75	0,74	0,01
Média (min)		0,76	-0,01
Desvio-padrão (min)		0,02	0,02
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,01	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		0,90%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		0,00 -0,01

OBS: Limite superior igual a 0 e inferior igual a -0,01, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.16 – Validação do modelo para ‘Quantidade de *face shields* montadas’

Replicação	Produção real (unidades)	Produção simulada (unidades)	Diferença entre produções (Real - Simulado)
1	16.219	16.216	3,00
2	16.219	16.210	9,00
3	16.219	16.237	-18,00
4	16.219	16.222	-3,00
5	16.219	16.235	-16,00
6	16.219	16.239	-20,00
7	16.219	16.224	-5,00
8	16.219	16.206	13,00
9	16.219	16.227	-8,00
10	16.219	16.237	-18,00
11	16.219	16.219	0,00
12	16.219	16.216	3,00
13	16.219	16.229	-10,00
14	16.219	16.210	9,00
15	16.219	16.216	3,00
16	16.219	16.227	-8,00
17	16.219	16.234	-15,00
18	16.219	16.227	-8,00
19	16.219	16.226	-7,00
20	16.219	16.222	-3,00
21	16.219	16.211	8,00
22	16.219	16.220	-1,00
23	16.219	16.229	-10,00
24	16.219	16.227	-8,00
25	16.219	16.226	-7,00
26	16.219	16.216	3,00
27	16.219	16.234	-15,00
28	16.219	16.205	14,00
29	16.219	16.205	14,00
30	16.219	16.231	-12,00
31	16.219	16.218	1,00
32	16.219	16.235	-16,00
33	16.219	16.209	10,00
34	16.219	16.219	0,00
35	16.219	16.217	2,00
36	16.219	16.225	-6,00
37	16.219	16.214	5,00
38	16.219	16.214	5,00
39	16.219	16.217	2,00
40	16.219	16.210	9,00
Média (unidades)		16.221,53	-2,53
Desvio-padrão (unidades)		9,60	9,60
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (unidades)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	4,11	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		0,03%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,59 -6,64

OBS: Limite superior igual a 1,59 e inferior igual a -6,64, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.17 – Validação do modelo para ‘Quantidade de *face shields* entregues no Campus Central’

Replicação	Produção real (unidades)	Produção simulada (unidades)	Diferença entre produções (Real - Simulado)
1	7.457	7.332	125,00
2	7.457	8.060	-603,00
3	7.457	7.332	125,00
4	7.457	7.826	-369,00
5	7.457	7.254	203,00
6	7.457	7.306	151,00
7	7.457	8.034	-577,00
8	7.457	7.982	-525,00
9	7.457	7.462	-5,00
10	7.457	7.748	-291,00
11	7.457	7.228	229,00
12	7.457	7.540	-83,00
13	7.457	6.682	775,00
14	7.457	7.384	73,00
15	7.457	7.800	-343,00
16	7.457	7.722	-265,00
17	7.457	7.514	-57,00
18	7.457	7.384	73,00
19	7.457	8.190	-733,00
20	7.457	7.332	125,00
21	7.457	7.020	437,00
22	7.457	7.774	-317,00
23	7.457	7.410	47,00
24	7.457	7.982	-525,00
25	7.457	7.462	-5,00
26	7.457	7.072	385,00
27	7.457	7.540	-83,00
28	7.457	7.930	-473,00
29	7.457	7.852	-395,00
30	7.457	7.436	21,00
31	7.457	7.566	-109,00
32	7.457	7.670	-213,00
33	7.457	7.462	-5,00
34	7.457	7.930	-473,00
35	7.457	7.774	-317,00
36	7.457	7.254	203,00
37	7.457	7.514	-57,00
38	7.457	7.228	229,00
39	7.457	7.956	-499,00
40	7.457	7.410	47,00
Média (unidades)		7558,85	-101,85
Desvio-padrão (unidades)		325,11	325,11
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (unidades)	$\left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	139,20	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		1,87%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		37,35 -241,05

OBS: Limite superior igual a 37,35 e inferior igual a -241,05, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.18 – Validação do modelo para ‘Quantidade de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km’

Replicação	Produção real (unidades)	Produção simulada (unidades)	Diferença entre produções (Real - Simulado)
1	8.637	8.758	-121,00
2	8.637	8.108	529,00
3	8.637	8.732	-95,00
4	8.637	8.394	243,00
5	8.637	8.862	-225,00
6	8.637	8.862	-225,00
7	8.637	8.108	529,00
8	8.637	8.134	503,00
9	8.637	8.602	35,00
10	8.637	8.316	321,00
11	8.637	8.992	-355,00
12	8.637	8.628	9,00
13	8.637	9.434	-797,00
14	8.637	8.654	-17,00
15	8.637	8.290	347,00
16	8.637	8.550	87,00
17	8.637	8.576	61,00
18	8.637	8.732	-95,00
19	8.637	7.900	737,00
20	8.637	8.732	-95,00
21	8.637	9.200	-563,00
22	8.637	8.420	217,00
23	8.637	8.784	-147,00
24	8.637	8.186	451,00
25	8.637	8.654	-17,00
26	8.637	9.096	-459,00
27	8.637	8.524	113,00
28	8.637	8.186	451,00
29	8.637	8.290	347,00
30	8.637	8.784	-147,00
31	8.637	8.576	61,00
32	8.637	8.420	217,00
33	8.637	8.576	61,00
34	8.637	8.238	399,00
35	8.637	8.420	217,00
36	8.637	8.836	-199,00
37	8.637	8.680	-43,00
38	8.637	8.940	-303,00
39	8.637	8.134	503,00
40	8.637	8.680	-43,00
Média (unidades)		8574,70	62,30
Desvio-padrão (unidades)		328,45	328,45
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (unidades)	$\left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	140,63	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		1,63%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		202,93 -78,33

OBS: Limite superior igual a 202,98 e inferior igual a -78,33, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.19 – Validação do modelo para ‘Quantidade de *face shields* entregues em demandantes localizados acima de 30 km’

Replicação	Produção real (unidades)	Produção simulada (unidades)	Diferença entre produções (Real - Simulado)
1	125	115,82	9,18
2	125	74,85	50,15
3	125	161,49	-36,49
4	125	66,03	58,97
5	125	116,15	8,85
6	125	76,07	48,93
7	125	91,91	33,09
8	125	135,89	-10,89
9	125	152,77	-27,77
10	125	161,62	-36,62
11	125	66,09	58,91
12	125	97,43	27,57
13	125	130,31	-5,31
14	125	157,16	-32,16
15	125	131,56	-6,56
16	125	34,40	90,60
17	125	145,84	-20,84
18	125	128,33	-3,33
19	125	142,21	-17,21
20	125	172,18	-47,18
21	125	44,05	80,95
22	125	80,20	44,80
23	125	84,52	40,48
24	125	100,58	24,42
25	125	122,94	2,06
26	125	94,78	30,22
27	125	173,03	-48,03
28	125	129,21	-4,21
29	125	76,19	48,81
30	125	87,33	37,67
31	125	120,98	4,02
32	125	160,35	-35,35
33	125	175,46	-50,46
34	125	95,41	29,59
35	125	83,78	41,22
36	125	130,04	-5,04
37	125	101,87	23,13
38	125	109,42	15,58
39	125	155,83	-30,83
40	125	164,33	-39,33
Média (unidades)		116,21	8,79
Desvio-padrão (unidades)		37,26	37,26
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (unidades)	$\left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	15,95	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		12,76%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		24,74 -7,17

OBS: Limite superior igual a 24,74 e inferior igual a -7,17, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.20 – Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de *face shields* entregues no Campus Central’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	5	4,94	0,06
2	5	4,55	0,45
3	5	4,66	0,34
4	5	5,40	-0,40
5	5	5,61	-0,61
6	5	4,20	0,80
7	5	3,98	1,02
8	5	5,05	-0,05
9	5	4,87	0,13
10	5	4,00	1,00
11	5	5,03	-0,03
12	5	4,33	0,67
13	5	5,28	-0,28
14	5	5,34	-0,34
15	5	4,74	0,26
16	5	4,59	0,41
17	5	4,25	0,75
18	5	4,29	0,71
19	5	4,43	0,57
20	5	4,42	0,58
21	5	4,91	0,09
22	5	4,09	0,91
23	5	3,76	1,24
24	5	5,35	-0,35
25	5	5,85	-0,85
26	5	4,91	0,09
27	5	4,64	0,36
28	5	4,13	0,87
29	5	5,47	-0,47
30	5	4,89	0,11
31	5	6,05	-1,05
32	5	5,44	-0,44
33	5	5,63	-0,63
34	5	4,36	0,64
35	5	5,21	-0,21
36	5	4,91	0,09
37	5	3,73	1,27
38	5	5,36	-0,36
39	5	4,60	0,40
40	5	5,61	-0,61
Média (min)		4,82	0,18
Desvio-padrão (min)		0,59	0,59
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	0,25	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		5,07%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1;\frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		0,43 -0,08

OBS: Limite superior igual a 0,43 e inferior igual a -0,08, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
 Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.21 – Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados em até 30 km’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	27,21	26,03	1,18
2	27,21	27,05	0,16
3	27,21	26,63	0,58
4	27,21	26,55	0,66
5	27,21	24,92	2,29
6	27,21	26,88	0,33
7	27,21	27,32	-0,11
8	27,21	25,44	1,77
9	27,21	24,25	2,96
10	27,21	30,57	-3,36
11	27,21	25,54	1,67
12	27,21	35,36	-8,15
13	27,21	33,48	-6,27
14	27,21	23,99	3,22
15	27,21	27,95	-0,74
16	27,21	31,09	-3,88
17	27,21	26,75	0,46
18	27,21	28,88	-1,67
19	27,21	32,14	-4,93
20	27,21	23,68	3,53
21	27,21	30,48	-3,27
22	27,21	24,80	2,41
23	27,21	29,98	-2,77
24	27,21	29,37	-2,16
25	27,21	23,76	3,45
26	27,21	26,67	0,54
27	27,21	30,76	-3,55
28	27,21	24,95	2,26
29	27,21	25,32	1,89
30	27,21	28,23	-1,02
31	27,21	24,39	2,82
32	27,21	21,17	6,04
33	27,21	21,48	5,73
34	27,21	30,71	-3,50
35	27,21	27,42	-0,21
36	27,21	29,92	-2,71
37	27,21	25,02	2,19
38	27,21	27,41	-0,20
39	27,21	24,25	2,96
40	27,21	24,74	2,47
Média (min)		27,13	0,08
Desvio-padrão (min)		3,14	3,14
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	1,34	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		4,94%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		1,42 -1,27

OBS: Limite superior igual a 1,42 e inferior igual a -1,27, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 8.22 – Validação do modelo para ‘Tempo de entrega de *face shields* entregues em demandantes localizados acima de 30 km’

Replicação	Tempo real (minutos)	Tempos da Simulação (minutos)	Diferença entre tempos (Real - Simulado)
1	195,1	140,06	55,04
2	195,1	186,13	8,97
3	195,1	147,91	47,19
4	195,1	229,86	-34,76
5	195,1	113,03	82,07
6	195,1	157,26	37,84
7	195,1	148,28	46,82
8	195,1	244,98	-49,88
9	195,1	243,45	-48,35
10	195,1	182,82	12,28
11	195,1	175,05	20,05
12	195,1	221,00	-25,90
13	195,1	151,78	43,32
14	195,1	202,85	-7,75
15	195,1	146,31	48,79
16	195,1	172,98	22,12
17	195,1	150,64	44,46
18	195,1	115,46	79,64
19	195,1	185,10	10,00
20	195,1	198,35	-3,25
21	195,1	187,34	7,76
22	195,1	174,75	20,35
23	195,1	200,24	-5,14
24	195,1	199,02	-3,92
25	195,1	124,61	70,49
26	195,1	62,73	132,37
27	195,1	216,94	-21,84
28	195,1	226,56	-31,46
29	195,1	184,17	10,93
30	195,1	228,10	-33,00
31	195,1	180,14	14,96
32	195,1	260,45	-65,35
33	195,1	97,49	97,61
34	195,1	177,96	17,14
35	195,1	151,17	43,93
36	195,1	162,98	32,12
37	195,1	205,54	-10,44
38	195,1	168,60	26,50
39	195,1	192,86	2,24
40	195,1	221,52	-26,42
Média (min)		178,41	16,69
Desvio-padrão (min)		42,22	42,22
	n-1	39	39
	alfa	0,01	0,01
	alfa/2	0,005	0,005
	[1-(alfa/2)]	0,995	0,995
	t student	2,71	2,71
Precisão do modelo de simulação (min)	$\left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{SIM}}{\sqrt{n}} \right]$	18,08	
Erro do resultado médio do modelo em relação ao valor real (%)		9,27%	
Intervalo da média da diferença	$IC = (X_{DIF}) \pm \left[(t_{n-1; \frac{\alpha}{2}}) \times \frac{S_{DIF}}{\sqrt{n}} \right]$		34,77 -1,39

OBS: Limite superior igual a 34,77 e inferior igual a -1,39, ou seja, o intervalo contém o 0 (Zero).
Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

APÊNDICE S – Programação computacional do modelo AM-HUB no software ProModel for Windows

Tempo: Minutos
Distância: Metros

* Locais *

Nome	Cap	Unidade	Estatísticas	Regras	Custo
FORNECEDOR_PLA	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
FORNECEDOR_PETG	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
FORNECEDOR_FITA	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1	1	12	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	Primeiro
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.1	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.2	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.3	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.4	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.5	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.6	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.7	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.8	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.9	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.10	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.11	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.12	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_2	1	2	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	Primeiro
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.1	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.2	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PLA	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
CORTE_LASER	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FOLHA_PETG	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FITA	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
MONTAGEM_FINAL	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PEAÇA_TIPO_1	inf	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PEAÇA_TIPO_2	inf	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_VISOR	inf	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FITA_CORTADA	inf	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FACE_SHIELD	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
CORTE_DA_FITA	1	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_até_30_km	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	2	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	13	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
ACABAMENTO_PEAÇA_TIPO_1	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_acima_de_30_km	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_Campus_Central	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
Entrega_Kit	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
Descarte_de_peças	inf	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	
SAÍDA_DA_MONTAGEM	INF	1	Série de Tempo	0 Mais Velho, ,	

* Recursos *

Nome	Unid	Rec	Ent	Caminho	Movimentação	Custo
veículo_de_entrega_de_PLA	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_PLA Base: R1 (Retornar)	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_de_PETG	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_PETG Base: R1	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_de_Fita	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_Fita Base: R1	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_Face_Shield	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_Face_Shield_até_3 Base: R2 (Retornar)	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_Face_Shield	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_Face_Shield_acima Base: R2 (Retornar)	Vazio: 50 mpm Cheio: 50 mpm	
entregador	1	Por Unidade Mais Próximo	Mais Velha	Rede_entrega_Face_Shield_Campu Base: R2 (Retornar)	Vazio: 50 mpm Cheio: 50 mpm	

 * Paradas por relógio para Locais *

Loc	Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado	Desab	Lógica
IMPRESSORA_3D_TIPO_1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.3	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.4	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.5	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.6	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.7	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.8	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.9	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.10	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.11	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.12	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10080 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min

 * Redes de Caminho *

Nome	Tipo	T/S	De	Para	BI	String	Fator de Velocidade
Rede_entrega_PLA	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	B(0.507, 1., 35.2, 52)	
Rede_entrega_PETG	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	B(0.808, 1.26, 12.6, 21.4)	
Rede_entrega_Fita	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	10.1-L(22.5, 4.34)	
Rede_entrega_Face_Shield_até_3	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6)	
Rede_entrega_Face_Shield_acima	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	B(1.37, 0.982, 34.1, 320)	
Rede_entrega_Face_Shield_Campu	Passante	Tempo	R1	R2	Bi	B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27)	

 * Interfaces *

Red	Nó	Local
Rede_entrega_PLA	R1	FORNECEDOR_PLA
	R2	Entrega_Kit
Rede_entrega_PETG	R2	ESTOQUE_FOLHA_PETG
	R1	FORNECEDOR_PETG
Rede_entrega_Fita	R2	ESTOQUE_FITA
	R1	FORNECEDOR_FITA
Rede_entrega_Face_Shield_até_3	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_até_30_km
Rede_entrega_Face_Shield_acima	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_acima_de_30_km
Rede_entrega_Face_Shield_Campu	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_Campus_Central

 * Entidades *

Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas	Custo
BOBINA_PLA	150	Série de Tempo	
FOLHA_PETG	150	Série de Tempo	
ROLO_DE_FITA	150	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_1	150	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_2	150	Série de Tempo	
FITA_CORTADA	150	Série de Tempo	
VISOR	150	Série de Tempo	
FACE_SHIELD	150	Série de Tempo	
LOTE_DE_ENTREGA	150	Série de Tempo	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	150	Série de Tempo	
ORDEM_DE_ENTREGA	150	Série de Tempo	
KIT_FILAMENTO_PEÇA_TIPO_1	50	Série de Tempo	
KIT_FILAMENTO_PEÇA_TIPO_2	50	Série de Tempo	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1	50	Série de Tempo	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO_TIPO_2	50	Série de Tempo	
LOTE_PEÇA_TIPO_1	50	Série de Tempo	
LOTE_PEÇA_TIPO_2	50	Série de Tempo	
LOTE_DE_ENTREGA_FS	50	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	50	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	50	Série de Tempo	

 * Chegadas *

Entidade	Local	QTD. por Vez	Primeira Vez	Ocorrências	Frequência Lógica
BOBINA_PLA	Entrega_kit	1	Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM	inf	1 wk
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	635	Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	50	Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	4240	Wed, Apr 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	851	Mon, May 04 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	2237	Mon, Jun 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	320	Wed, Jul 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	223	Mon, Aug 03 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	3702	Tue, Sep 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	110	Thu, Oct 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	2250	Tue, Nov 03 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	0	Tue, Dec 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	0	Mon, Jan 04 2021 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	1836	Mon, Feb 01 2021 @ 08:00 AM	1	
FOLHA_PETG	ESTOQUE_FOLHA_PETG	23	0	20	1 wk
ROLO_DE_FITA	ESTOQUE_FITA	5	0	34	1 wk
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1292	Wed, Apr 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1548	Mon, May 04 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	914	Mon, Jun 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1589	Wed, Jul 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	2928	Mon, Aug 03 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	2284	Tue, Sep 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1288	Thu, Oct 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	800	Tue, Nov 03 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	600	Tue, Dec 01 2020 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	800	Mon, Jan 04 2021 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	300	Mon, Feb 01 2021 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1016	Thu, Apr 01 2021 @ 08:00 AM	1	
ORDEM_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	810	Mon, May 03 2021 @ 08:00 AM	1	

 * Designações de Turno *

Locais...	Recursos...	Arquivo de Calendário...	Prioridades...	Desabilitar Lógica...
CORTE_DA_FITA	entregador	C:\Users\10082158\Desktop\@@_T	99,99,99,99	Não
ESTOQUE_FACE_SHIELD	veículo_de_entrega_de_Fita			
ESTOQUE_FITA	veículo_de_entrega_de_PETG			
ESTOQUE_FITA_CORTADA	veículo_de_entrega_de_PLA			
ESTOQUE_FOLHA_PETG	veículo_de_entrega_Face_Shield			
ESTOQUE_PLA	veículo_de_entrega_Face_Shield			
ESTOQUE_VISOR				
FORNECEDOR_FITA				
FORNECEDOR_PETG				
FORNECEDOR_PLA				
MONTAGEM_FINAL				
Entrega_kit				
IMPRESSORA_3D_TIPO_1		C:\Users\10082158\Desktop\@@_T	99,99,99,99	Não
IMPRESSORA_3D_TIPO_2				
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1				
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2				
ACABAMENTO_PEÇA_TIPO_1				
ESTOQUE_PEÇA_TIPO_1				
ESTOQUE_PEÇA_TIPO_2				
CORTE_LASER		Calendário corte.pmc1	99,99,99,99	Não
CORTE_DA_FITA				

 * PROCESSAMENTO *

		Processo		Roteamento			
Entidade	Local	Operação	Bl	Saída	Destino	Regra	Lógica de Movimento
BOBINA_PLA	ESTOQUE_PLA	TEMPO_DE_ENTREGA_PLA=B(0.507, 1.,35.2, 52) wait 5 min Route 1 Route 2					
ORDEN_DE_PRODUÇÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	1 KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_1 2* KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_2		PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1 PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	Join 1 Join 1		Move For 0.1 min Move For 0.1 min
ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	1 ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1 2* ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_2		PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1 PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	FIRST 1 FIRST 1		Move For 0.1 min Move For 0.1 min
ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1	IMPRESSORA_3D_TIPO_1	LEAD_TIME_PECA_1=CLOCK(MIN) INÍCIO_DO_LEAD_TIME_DE_PRODUÇÃO=Clock(MIN) JOIN 1 KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_1 Inc PECAS_TIPO_1_IMPRESSAS,1 combine 2 wait 5.27+4.72*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)--0.133)/0.512))) min TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STAND_BY=5.27+4.72*(1/(1+EXP(-(N(0.,1.)--0.133)/0.512))) CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1_STAND_BY=5*TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STAND_BY 1 ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1 IMPRESSORA_3D_TIPO_1		IMPRESSORA_3D_TIPO_1	FIRST 1		Move For 0.1 min
PEÇA_TIPO_1	ACABAMENTO_PECA_TIPO_1	wait B(0.507, 1.,302, 361) min TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMPRESSORA_1= B(0.507, 1.,302, 361) Inc CONSUMO_DE_PLA_PECA_TIPO_1,93.66 CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1=10*TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMPRESSORA_TIPO_1 1 PECA_TIPO_1		ACABAMENTO_PECA_TIPO_1	FIRST 2		
PEÇA_TIPO_1	ACABAMENTO_PECA_TIPO_1	wait -2.05+(6, 4.93) MIN Inc RESÍDUOS_DE_PLA_PECA_TIPO_1,1.87 1 PECA_TIPO_1		ESTOQUE_PECA_TIPO_1 Descarte_de_pecas	0.99 1 0.01		Move For 0.1 MIN Move For 0.1 MIN
PEÇA_TIPO_1	ESTOQUE_PECA_TIPO_1	1 PECA_TIPO_1		MONTAGEM_FINAL	FIRST 1		Move For 0.1 MIN
ORDEN_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	1 ORDEN_DE_ENTREGA		ESTOQUE_FACE_SHIELD	FIRST 1		Move For 0.1 MIN
ORDEN_DE_ENTREGA	ESTOQUE_FACE_SHIELD	Join 1 FACE_SHIELD Combine 26 SAÍDA_DO_ESTOQUE=Clock(MIN) 1 LOTE_DE_ENTREGA_FS		DEMANDANTE_até_30_km DEMANDANTE_acima_de_30_km DEMANDANTE_Campus_Central	0.53 1 0.01 0.46		Move with veiculo_de_entrega_face_Shield_até_30_km Then FREE Move with veiculo_de_entrega_face_Shield_acima_de_30_km Then FREE Move with entregador Then FREE
PEÇA_TIPO_1	MONTAGEM_FINAL	CHEGADA_NA_MONTAGEM=CLOCK(MIN) Join 1 PECA_TIPO_2 Join 1 VISOR Join 1 FITA_CORTADA wait B(0.97, 1.08, 0.66, 0.87) min Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_MONTADAS,1 TEMPO_DE_CICLO_DE_MONTAGEM=B(0.97, 1.08, 0.66, 0.87) LEAD_TIME_DE_PRODUÇÃO=Clock(min)-LEAD_TIME_PECA_1 1 FACE_SHIELD		SAÍDA_DA_MONTAGEM	FIRST 1		Move For 0.1 min
LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_até_30_km	Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_até_30_km, 26 TEMPO_DE_ENTREGA_DO_FACE_SHIELD_até_30_Km=B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6) wait 1 DAY 1 FACE_SHIELD		EXIT	FIRST 1		
LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_acima_de_30_km	Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_acima_de_30_km, 26 TEMPO_DE_ENTREGA_DO_FACE_SHIELD_acima_de_30_Km=B(1.37, 0.982, 34.1, 320) wait 1 DAY 1 FACE_SHIELD		EXIT	FIRST 1		
LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_Campus_Central	Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_Campus_Central,26 TEMPO_DE_ENTREGA_DO_FACE_SHIELD_Campus_Central=B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27) wait 1 DAY 1 FACE_SHIELD		EXIT	FIRST 1		
ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_2	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_2=CLOCK(MIN) JOIN 1 KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_2 Combine 13 Inc PECAS_TIPO_2_IMPRESSAS,13 wait B(0.859, 0.914, 30.4, 39) min TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STAND_BY=B(0.859, 0.914, 30.4, 39) CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2_STAND_BY=5*TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STAND_BY 1 LOTE_PECA_TIPO_2		IMPRESSORA_3D_TIPO_2	FIRST 1		Move For 0.1 min
LOTE_PECA_TIPO_2	IMPRESSORA_3D_TIPO_2	wait B(0.802, 1.25, 306, 414) min Inc CONSUMO_PLA_PECA_TIPO_2,117.52 TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMPRESSORA_2=B(0.802, 1.25, 306, 414) CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2=10*TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMPRESSORA_TIPO_2 1 PECA_TIPO_2		ESTOQUE_PECA_TIPO_2 Descarte_de_pecas	0.99 13 0.01		MOVE FOR 0.1 MIN MOVE FOR 0.1 MIN
PEÇA_TIPO_2	ESTOQUE_PECA_TIPO_2	Inc RESÍDUO_PLA_PECA_TIPO_2,0.091 1 PECA_TIPO_2		MONTAGEM_FINAL	Join 1		Move For 0.1 min
FOLHA_PETG	ESTOQUE_FOLHA_PETG	TEMPO_DE_ENTREGA_PETG=B(0.808, 1.26, 12.6, 21.4) wait 5 min 1 FOLHA_PETG		PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	FIRST 1		Move for 0.1 min
FOLHA_PETG	PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	wait B(0.489, 0.873, 4.01, 6.85) min 1 FOLHA_PETG		CORTE_LASER	FIRST 3		Move for 0.1 min
FOLHA_PETG	CORTE_LASER	Início_do_corte= Clock(min) wait 1.65+16(2.45, 0.34) min wait W(17.6, 1.02) min wait B(1.38, 1.24, 6.04, 8.92) min TEMPO_DE_CICLO_CORTE_LASER=Clock(min)-início_do_corte Inc CONSUMO_DE_PETG,1.93 Inc RESÍDUOS_DE_PETG,0.095 CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER_STAND_BY=5*(17.6, 1.02) CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER=5*(1.38, 1.24, 6.04, 8.92) 1 VISOR		ESTOQUE_VISOR MONTAGEM_FINAL	FIRST 12 Join 1		Move for 0.1 min Move for 0.1 min
VISOR	ESTOQUE_VISOR	1 VISOR		ESTOQUE_VISOR	FIRST 12		Move for 0.1 min
ROLO_DE_FITA	ESTOQUE_FITA	TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FITA=10.1+(22.5, 4.34) wait 5 min 1 ROLO_DE_FITA		CORTE_DA_FITA	FIRST 1		Move for 0.1 min
ROLO_DE_FITA	CORTE_DA_FITA	wait 3 min TEMPO_DE_CICLO_CORTE_DA_FITA=3 Inc CONSUMO_DE_FITA,96 1 FITA_CORTADA		ESTOQUE_FITA_CORTADA MONTAGEM_FINAL	FIRST 96 Join 1		Move for 0.1 min Move for 0.1 min
FITA_CORTADA	ESTOQUE_FITA_CORTADA	Inc ENTREGAS_PLA,1 1 BOBINA_PLA		ESTOQUE_PLA	FIRST 1000		move for 0.1 min
BOBINA_PLA	Entrega_kit	Inc PECAS_DESCARTADAS_TIPO_2,1 Accum 10 wait 10 min 1 PECA_TIPO_2_REJEITADA		EXIT	FIRST 1		
PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	Descarte_de_pecas	Inc PECAS_DESCARTADAS_TIPO_1,1 Accum 10 wait 10 min 1 PECA_TIPO_1_REJEITADA		EXIT	FIRST 1		
PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	Descarte_de_pecas	wait 10 min 1 PECA_TIPO_1_REJEITADA		EXIT	FIRST 1		
FACE_SHIELD	SAÍDA_DA_MONTAGEM	1 FACE_SHIELD		ESTOQUE_FACE_SHIELD	Join 1		

 * Atributos *

Nome	Tipo	Classificação
LEAD_TIME_Peca_1	Real	Entidade

 * Variáveis (globais) *

Nome	Tipo	Valor Inicial	Estatísticas
TEMPO_DE_CICLO_Peca_TIPO_1_IMP	Real	0	Série de Tempo
PEÇAS_TIPO_1_IMPRESSAS	Inteiro	0	Série de Tempo
PEÇAS_TIPO_2_IMPRESSAS	Inteiro	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_Peca_TIPO_2_IMP	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_CORTE_LASER	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_CORTE_DA_FITA	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_DE_MONTAGEM	Real	0	Série de Tempo
LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO	Real	0	Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_MON	Inteiro	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_PLA	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_PETG	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FITA	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DO_FACE_SHIEL	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_PLA_Peca_TIPO_1	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_PETG	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_FITA	Inteiro	0	Série de Tempo
RESÍDUOS_DE_PLA_Peca_TIPO_1	Real	0	Série de Tempo
RESÍDUOS_DE_PETG	Real	0	Série de Tempo
MOMENTO_DE_SAÍDA_DO_FORNECEDOR	Real	0	Série de Tempo
INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_1	Real	0	Série de Tempo
CHEGADA_NA_MONTAGEM	Real	0	Série de Tempo
SAÍDA_DO_ESTOQUE	Real	0	Série de Tempo
INÍCIO_DO_LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIEL	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIEL	Real	0	Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENT	Inteiro	0	Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENT	Inteiro	0	Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENT	Inteiro	0	Série de Tempo
INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_2	Real	0	Série de Tempo
MOMENTO_DE_SAÍDA_DO_FORNECEDOR	Real	0	Série de Tempo
MOMENTO_DE_SAÍDA_DO_FORNECEDOR	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STA	Real	0	Série de Tempo
INÍCIO_TEMPO_STAND_BY	Real	0	Série de Tempo
TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER	Real	0	Série de Tempo
CONSUMO_PLA_Peca_TIPO_2	Real	0	Série de Tempo
RESÍDUO_PLA_Peca_TIPO_2	Real	0	Série de Tempo
ENTREGAS_PLA	Inteiro	0	Série de Tempo
PEÇAS_DESCARTADAS_TIPO_2	Inteiro	0	Série de Tempo
PEÇAS_DESCARTADAS_TIPO_1	Inteiro	0	Série de Tempo
Início_do_corte	Real	0	Série de Tempo
INÍCIO_PREPARAÇÃO_1	Real	0	Série de Tempo
INÍCIO_PREPARAÇÃO_2	Real	0	Série de Tempo

 * Arquivos Externos *

Nome	Tipo	Nome de Arquivo	Prompt
(null)	Turno	C:\Users\10082158\Desktop\@@_Tese\@21denovembro\Calendário operadores.pmc1	
(null)	Turno	C:\Users\10082158\Desktop\@@_Tese\@21denovembro\Calendário impressoras.pmc1	
(null)	Turno	Calendário corte.pmc1	

APÊNDICE T – Cenários de simulação e resultados do LCIA para distribuição de face shields

Quadro 8.11 – Cenários com distâncias entre demandantes e centros de produção para as duas configurações (centralizada e descentralizada)

Demandante	Distância Solicitante-AM-HUB (km)	Distância Solicitante-produtor Cluster (km)	Cluster	Demandante	Distância Solicitante-AM-HUB (km)	Distância Solicitante-produtor Cluster (km)	Cluster		
Cenário 1	Instituição 1	3,9	8,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 40	Instituição 32	296	10,6	Santa Maria
Cenário 2	Instituição 2	11,7	13,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 41	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 3	Instituição 3	9,2	2,9	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 42	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 4	Instituição 4	10,4	10,4	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 43	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 5	Instituição 5	2,3	2,3	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 44	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 6	Instituição 6	9,7	2,4	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 45	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 7	Instituição 7	6,5	2,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 46	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 8	Instituição 7	6,5	2,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 47	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 10	Instituição 8	9,3	3	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 48	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 9	Instituição 8	9,3	3	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 49	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 11	Instituição 9	6,8	6,8	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 50	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 12	Instituição 10	20,9	15,4	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 51	Instituição 33	14,6	14,6	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 13	Instituição 11	8,2	2,1	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 52	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 14	Instituição 12	4,9	4,2	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 53	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 15	Instituição 13	11,5	11,5	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 54	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 16	Instituição 14	6,6	6,6	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 55	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 17	Instituição 15	10,6	10,6	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 56	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 18	Instituição 16	5,9	5,9	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 57	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 19	Instituição 17	10,3	5,1	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 58	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 20	Instituição 18	7,3	7,3	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 59	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 21	Instituição 18	7,3	7,3	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 60	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 22	Instituição 19	6,3	1,7	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 61	Instituição 35	2,1	2,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 23	Instituição 20	7,4	1,2	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 62	Instituição 36	1,8	1,8	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 24	Instituição 20	7,4	1,2	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 63	Instituição 36	1,8	1,8	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 25	Instituição 21	7,5	1,9	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 64	Instituição 36	1,8	1,8	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 26	Instituição 21	7,5	1,9	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 65	Instituição 36	1,8	1,8	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 27	Instituição 21	7,5	1,9	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 66	Instituição 37	5,4	6,6	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 28	Instituição 22	6,7	6,7	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 67	Instituição 38	3,3	3,3	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 29	Instituição 23	6,1	3,1	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 68	Instituição 39	124	11,8	Litoral
Cenário 30	Instituição 24	6	8,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 69	Instituição 39	124	11,8	Litoral
Cenário 31	Instituição 25	105	12	Litoral	Cenário 70	Instituição 40	4,9	4,7	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 32	Instituição 26	5,2	8	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 71	Instituição 41	5,8	4,6	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 33	Instituição 27	5,7	3,9	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 72	Instituição 42	5,7	3,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 34	Instituição 28	1,9	1,9	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 73	Instituição 43	9,7	2,3	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 35	Instituição 29	37,2	4,3	São Leopoldo	Cenário 74	Instituição 43	9,7	2,3	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 36	Instituição 30	3,2	3,2	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 75	Instituição 44	5,9	8,6	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 37	Instituição 30	3,2	3,2	Parte de Porto Alegre e Viamão	Cenário 76	Instituição 45	6,6	8,5	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul
Cenário 38	Instituição 31	9,2	4	Parte de Porto Alegre e Eldorado do Sul	Cenário 77	Instituição 46	12,1	12,1	Parte de Porto Alegre e Viamão
Cenário 39	Instituição 32	296	10,6	Santa Maria					

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Tabela 8.23 – Resultados da LCIA para a distribuição na configuração AM-HUB

Cenário de transporte LCA	Distância (km)	Resultados LCIA (Centralizado)																	Resultados LCIA (Centralizado)					
		Método: ReCiPe 2008 Midpoint (H) V1.09 / World 2016 H																	Método: Cumulative Energy Demand V1.11 / Cumulative energy demand					
		Global warming (kg CO ₂ -eq)	Stratospheric ozone depletion (kg CFC-11 eq)	Ionizing radiation (kBq Co-60 eq)	Ozone formation, Human health (kg NMOC eq)	Fine particulate matter formation (kg PM _{2.5} eq)	Ozone formation, Terrestrial ecosystems (kg NOx eq)	Terrestrial acidification (kg SO ₂ eq)	Freshwater eutrophication (kg P eq)	Marine eutrophication (kg N eq)	Terrestrial eutrophication (kg 1,4-DCB eq)	Freshwater eutrophication (kg 1,4-DCB eq)	Marine eutrophication (kg 1,4-DCB eq)	Human carcinogenic toxicity (kg 1,4-DCB eq)	Human non-carcinogenic toxicity (kg 1,4-DCB eq)	Land use (m² a crop eq)	Mineral resource scarcity (kg Cu eq)	Fossil resource scarcity (kg oil eq)	Water consumption (m³ eq)	Non renewable, fossil (MJ)	Non-renewable, nuclear (MJ)	Non-renewable, biomass (MJ)	Renewable, biomass (MJ)	Renewable, wind, solar, geothermal (MJ)
Cenário 1	3,9	0,8813662	3,5448E-07	0,000029625	0,000316441	0,000896456	0,000081287	1,60898E-06	1,50026E-05	3,78861E-07	0,000039785	0,000539505	0,000468157	0,0000471	0,000032582	0,7538224	0,001294548	11,54424	0,05868904	3,69979E-05	0,000849653	0,00849736	0,01614339	
Cenário 2	11,7	2,6741589	1,02347E-06	0,00088575	0,000293252	0,002999359	0,000479716	4,83028E-06	3,57079E-05	1,13885E-06	0,002272956	0,000947811	0,001617006	0,000274447	0,000032582	0,7538224	0,001294548	34,63772	0,17676851	0,00010814	0,020548959	0,02564612	0,04841317	
Cenário 3	9,2	2,107258	8,36232E-07	0,000541443	0,000484676	0,002727769	0,000270579	3,79486E-06	4,40833E-05	8,92999E-07	0,00142514	0,000612094	0,0012175	0,000162803	0,000078236	0,7538224	0,001294548	27,232566	0,11317011	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 4	10,4	2,370283	8,54936E-07	0,000512066	0,000478867	0,002727769	0,000270579	3,79486E-06	4,40833E-05	1,01563E-06	0,00147347	0,000612094	0,0012175	0,000162803	0,000078236	0,7538224	0,001294548	30,78464	0,11317011	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 5	2,3	0,5258686	2,0958E-07	0,000131361	0,00004216	0,000081629	0,000056812	0,000040895	9,47187E-07	1,21208E-06	2,73489E-07	0,000534547	0,000125251	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,000205599	6,808E-14	0,05284528	2,17839E-05	0,005284528	0,005284528	0,005284528
Cenário 6	5,7	2,117056	8,81848E-07	0,00057097	0,000491959	0,002707945	0,000270925	4,40111E-06	4,72226E-05	9,425444E-07	0,00127522	0,000602023	0,001218889	0,000162803	0,000078236	0,7538224	0,001294548	28,712597	0,11880979	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 7	6,5	1,485627	5,90816E-07	0,000351024	0,000305204	0,00160576	0,000088124	3,17111E-06	3,13019E-05	6,009834E-07	0,00089231	0,000511309	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,000205599	6,808E-14	0,05284528	2,17839E-05	0,005284528	0,005284528	0,005284528
Cenário 8	6,5	1,485627	5,90816E-07	0,000351024	0,000305204	0,00160576	0,000088124	3,17111E-06	3,13019E-05	6,009834E-07	0,00089231	0,000511309	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,000205599	6,808E-14	0,05284528	2,17839E-05	0,005284528	0,005284528	0,005284528
Cenário 9	9,3	2,156119	8,45322E-07	0,00047229	0,000386734	0,002707949	0,000270925	4,40111E-06	4,72226E-05	9,425444E-07	0,00127522	0,000602023	0,001218889	0,000162803	0,000078236	0,7538224	0,001294548	27,526372	0,1187769	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 10	5,3	1,256119	8,45322E-07	0,00047229	0,000386734	0,002707949	0,000270925	4,40111E-06	4,72226E-05	9,425444E-07	0,00127522	0,000602023	0,001218889	0,000162803	0,000078236	0,7538224	0,001294548	20,128419	0,00974067	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 11	6,8	1,541208	6,18052E-07	0,000400397	0,000313628	0,002005443	0,000173872	2,8049E-06	3,17146E-05	8,60728E-07	0,000815314	0,000368975	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,000205599	6,808E-14	0,05284528	2,17839E-05	0,005284528	0,005284528	0,005284528
Cenário 12	20,9	4,749127	1,8977E-06	0,002120218	0,000916979	0,005163137	0,000446079	8,62049E-06	0,000023063	20,38412E-07	0,00480687	0,002595964	0,000882515	0,000024885	0,000072005	0,3014443	0,002392445	61,866206	0,2984862	0,00037949	0,04842624	0,04842624	0,068514956	0,068514956
Cenário 13	8,2	1,841954	7,43187E-07	0,000482591	0,000414781	0,002666337	0,000270465	3,82328E-06	4,50047E-05	7,787016E-07	0,000730146	0,000378325	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	24,27305	0,1170075	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 14	4,9	1,119946	4,4538E-07	0,000288377	0,000260962	0,00039758	0,000211046	2,22118E-06	2,39925E-05	4,763107E-07	0,000148802	0,000586006	0,00067122	0,000675283	0,000574305	0,0001477	0,167574	0,00054277	14,504302	0,00968864	4,64929E-05	0,01118795	0,01074679	0,02028411
Cenário 15	6,6	1,508487	5,99906E-07	0,000384467	0,000353515	0,00200844	0,000148854	2,7224E-06	3,12898E-05	6,413181E-07	0,000536991	0,000176799	0,000021263	0,0001168573	0,000077553	0,000120178	0,1487654	0,00077719	18,536406	0,04243775	6,25103E-05	0,01497636	0,014467037	0,02732052
Cenário 16	11,5	2,626488	1,04239E-06	0,00218204	0,000910929	0,005163137	0,000446079	8,62049E-06	0,000023063	20,38412E-07	0,00480687	0,002595964	0,000882515	0,000024885	0,000072005	0,3014443	0,002392445	61,866206	0,2984862	0,00037949	0,04842624	0,04842624	0,068514956	0,068514956
Cenário 17	2,427244	9,84184E-07	0,00023837	0,000212964	0,00006007	0,00018285	4,97234E-06	5,13711E-05	1,71749E-06	0,00073993	0,000464999	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,000205599	6,808E-14	0,05284528	2,17839E-05	0,005284528	0,005284528	0,005284528	0,005284528
Cenário 18	5,9	1,348505	5,36279E-07	0,00034723	0,000318541	0,00202922	0,000145736	2,81878E-06	2,87838E-05	5,730024E-07	0,000736193	0,000521584	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	17,464863	0,0448224	5,88804E-05	0,01387937	0,01326595	0,02442282	0,02442282
Cenário 19	10,3	2,347123	9,56216E-07	0,000600381	0,000269073	0,0038729	0,002544513	3,021185E-06	4,2486E-05	5,04498E-06	0,0020984	0,001299803	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	21,628499	0,00000000	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 20	7,3	1,668481	6,63232E-07	0,000428264	0,000395213	0,00218204	0,00018285	3,01114E-06	3,56139E-05	7,39373E-07	0,000695627	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 21	7,3	1,668481	6,63232E-07	0,000428264	0,000395213	0,00218204	0,00018285	3,01114E-06	3,56139E-05	7,39373E-07	0,000695627	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 22	6,3	1,499306	5,72837E-07	0,000370771	0,000291699	0,000511174	0,001556152	3,29866E-06	3,07378E-05	6,121680E-07	0,000466746	0,000093606	0,000077078	0,000115393	0,000773892	0,000127123	0,4728274	0,000096461	16,648388	0,00999968	5,96698E-05	0,01429593	0,01389445	0,02047671
Cenário 23	7,4	1,613171	6,72621E-07	0,000454599	0,000400045	0,00218204	0,00018285	3,01114E-06	3,56139E-05	7,39373E-07	0,000695627	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 24	7,4	1,613171	6,72621E-07	0,000454599	0,000400045	0,00218204	0,00018285	3,01114E-06	3,56139E-05	7,39373E-07	0,000695627	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,00010615	0,020561005	0,02016673	0,03880138	
Cenário 25	7,5	1,7142031	6,87117E-07	0,000411984	0,000305074	0,000260854	0,000182801	3,016670E-06	3,68968E-05	7,787149E-07	0,000746216	0,000070399	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	22,20462	0,0107952	7,10145E-05	0,01078564	0,01648185	0,03046037	
Cenário 26	7,5	1,7142031	6,87117E-07	0,000411984	0,000305074	0,000260854	0,000182801	3,016670E-06	3,68968E-05	7,787149E-07	0,000746216	0,000070399	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	22,20462	0,0107952	7,10145E-05	0,01078564	0,01648185	0,03046037	
Cenário 27	6,7	1,513458	6,09995E-07	0,000394812	0,000294494	0,000260854	0,000182801	3,016670E-06	3,68968E-05	7,787149E-07	0,000746216	0,000070399	0,00012175	0,000317875	0,000269572	6,7891E-05	0,14869033	18,824122	0,00967714	6,34574E-05	0,0102525	0,010246235	0,0277446	
Cenário 28	2,9	1,324125	5,45438E-07	0,0003197	0,000232728	0,000494946	0,00150944	2,67914E-06	2,97867E-05	5,927341E-07	0,000423887	0,000570986	0,000023859	0,000119821	0,000774951	0,000120733	0,3943313	0,00067289	18,056735	0,00917006	9,77747E-05	0,01384765	0,01372495	0,02527077
Cenário 29	6,1	1,374325	5,54386E-07	0,000318994	0,000232728	0,000494946	0,00150944	2,67914E-06	2,97867E-05	5,927341E-07	0,000423887	0,000570986	0,000023859	0,000119821	0,000774951	0,000120733	0,3943313	0,00067289	18,056735	0,00917006	9,77747E-05	0,01384765	0,01372495	0,02527077
Cenário 30	10,5	2,398884	9,54939E-06	0,000719516	0,002109604	0,005195356	0,002592936	0,00224401	4,31306E-05	1,02208E-06	0,00444578	0,002672623	0,000451919	1,89888E-06	0,002106229	0,00287129	6,7890457	0,01517355	330,8046	1,4993228	0,00099482	0,282589	0,2931574	0,4346442
Cenário 31	5,2	1,188514	4,72631E-07	0,000300433	0,000248883	0,000215863	0,000130949	2,14882E-06	2,55888E-05	5,928156E-07	0,000121647	0,000865669	0,000023859	0,000119821	0,000774951	0,000120733	0,3943313	0,00067289	18,056735	0,00917006	9,77747E-05	0,01384765	0,01372495	0,02527077
Cenário 32	7,5	1,302794	5,1811E-07	0,000318583	0,000248883	0,000215863	0,000130949	2,14882E-06	2,55888E-05	5,928156E-07	0,000121647	0,000865669	0,00002385											

Tabela 8.24 – Resultados da LCIA para a distribuição na configuração AM-CLUSTER

		Resultados LCA (descentralizado)																Resultados LCA (descentralizado)																		
		Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World 2020) H																Método: Cumulative Energy Demand V1.11 / Cumulative energy demand																		
		Categorias de impacto																Categorias de impacto																		
Cenário de transporte LCA	Distância Solicitante-HUB (km)	Aquecimento global (kg CO ₂ eq)	Depleção do ozônio estratosférico (kg CFC-11 eq)	Radiação ionizante (kBq Co-60 eq)	Formação de ozônio humana (kg NO _x eq)	Formação de partículas finas (kg PM _{2.5} eq)	Formação de ozônio. Ecossistemas terrestres (kg NO _x eq)	Acidificação terrestre (kg SO ₂ eq)	Eutrofização de água doce (kg P eq)	Eutrofização de água doce (kg N eq)	Eutrofização de água doce (kg I-14-CDB)	Eutrofização de água doce (kg I-14-DCB)	Eutrofização de água doce (kg I-4-DCB)	Toxicidade cancerígena humana (kg I-14-CDB)	Toxicidade cancerígena humana (kg I-4-CDB)	Toxicidade cancerígena humana (kg I-14-CDB)	Toxicidade cancerígena humana (kg I-4-CDB)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Consumo de água (m ³)	Não renovável (fóssil) (MJ)	Não renovável (nuclear) (MJ)	Renováveis (biomassa)			Renováveis (eólica, solar, geotérmica) (MJ)	Renovável (água) (MJ)							
																									Usado da terra (m ² a crop eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)			Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)	Escassez de recursos minerais (kg Cu eq)				
Cenário 1	8.5	1.942635	7.726907	0.00179884	0.001707982	0.000698679	0.000181476	3.5061236	4.14682E-05	8.2594102	0.01714755	0.1504857	0.00099643	0.000232756	0.5490846	0.00397214	25.160523	0.12137456	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	25.160523	0.12137456	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297			
Cenário 2	13.9	3.085566	12.2708E-06	0.000794509	0.00212678	0.000195372	0.00330341	0.00281339	5.9856E-06	6.5813E-05	1.317887	0.003143026	0.0128342	0.001865787	0.23901285	0.001582208	0.000366971	0.8727473	0.00148517	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	39.960831	0.1977136E-06	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 3	2.5	0.6628251	2.6359E-07	0.000179672	0.0000582233	0.000233546	0.000018954	1.4184E-05	1.4184E-05	1.4184E-05	1.4184E-05	0.00014048	0.000047408	0.000040959	0.000135051	0.000014048	0.000000755	0.9410826	0.000319756	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	8.8841785	0.04141044	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 4	10.4	2.377023	9.4530E-07	0.00012066	0.000208977	0.000048342	0.000269217	0.002219698	4.2899E-06	5.0778E-05	10.10561	0.002421294	0.00973138	0.00143747	0.1841284	0.00121892	0.000208977	0.6723977	0.00114671	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	70.38464	0.14805304	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 5	2.3	0.5258886	2.9058E-07	0.0001361	0.00004612	0.000018619	0.00000192	0.000049895	9.4871E-07	1.1208E-05	2.234892	0.000525479	0.00125221	0.000131875	0.148696372	0.00006972	0.2981E-06	0.148696372	0.000052599	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	6.8081416	0.03824258	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297
Cenário 6	2.4	0.54545	2.18148E-07	0.00012346	0.000028254	0.000029286	0.000012338	9.8994E-07	1.1987E-05	2.3320689	0.000246209	0.000316698	0.000246209	0.000246209	0.148696372	0.000028254	0.000028254	0.6719376	0.000246209	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	7.041477	0.03427044	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297
Cenário 7	2.5	0.5714004	2.2723E-07	0.00014131	0.000052348	0.000020847	0.00006176	0.000033581	1.0312E-06	1.21965E-05	2.4292383	0.000052042	0.000339697	0.000035516	0.042426169	0.000299303	0.84576E-05	0.1616204	0.000275651	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	7.4001539	0.0356984	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 8	2.5	0.5714004	2.2723E-07	0.00014131	0.000052348	0.000020847	0.00006176	0.000033581	1.0312E-06	1.21965E-05	2.4292383	0.000052042	0.000339697	0.000035516	0.042426169	0.000299303	0.84576E-05	0.1616204	0.000275651	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	7.4001539	0.0356984	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 10	3	0.6858125	2.7268E-07	0.00017658	0.000062817	0.000024316	0.000074112	0.0000640297	1.23748E-05	1.46395E-05	2.91508	0.000068485	0.002807636	0.000414619	0.051113967	0.00051615	8.2181E-05	0.13994416	0.000307882	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	8.8801846	0.04283808	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 11	3	0.6858125	2.7268E-07	0.00017658	0.000062817	0.000024316	0.000074112	0.0000640297	1.23748E-05	1.46395E-05	2.91508	0.000068485	0.002807636	0.000414619	0.051113967	0.00051615	8.2181E-05	0.13994416	0.000307882	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	8.8801846	0.04283808	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297
Cenário 12	11.5	1.552108	6.1020E-06	0.0000197	0.001366386	0.000051743	0.001678872	0.001451341	2.8009E-06	3.31174E-05	6.607232	0.00183154	0.00630975	0.000939804	0.12093166	0.000796994	0.000182025	0.4386077	0.000749772	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	20.128149	0.070799617	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 12	15.4	3.5198304	1.3997E-06	0.000096329	0.000304662	0.000149536	0.003804417	0.00328886	6.3527E-06	7.51307E-05	1.4964108	0.00355378	0.01441253	0.0021238	0.2726517	0.00180458	0.000421699	0.99595004	0.001680312	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	15.488494	0.2190214	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 13	2.1	0.4799787	1.9087E-07	0.00021359	0.000017091	0.000048815	0.000048815	0.000048815	8.6219E-07	1.02451E-05	2.045062	0.00048815	0.000596345	0.000290234	0.031717977	0.000246131	5.75044E-05	0.1376091	0.000231547	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	6.2161292	0.02986656	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297
Cenário 14	4.2	0.9595375	3.81738E-07	0.00024781	0.000049384	0.000034783	0.000103758	0.00089164	1.73244E-05	2.04026E-05	4.611203	0.00097783	0.003903601	0.000580467	0.074339554	0.000492261	0.000118029	0.27152183	0.000463904	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	14.232258	0.09997312	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 15	6.6	1.5084987	5.9990E-07	0.000138247	0.001326198	0.000033044	0.000074112	0.000408654	2.7224E-06	3.21898E-05	6.0811093	0.001326198	0.00617699	0.000912163	0.118087073	0.00077553	0.000180728	0.24266716	0.000727719	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	19.536408	0.09424375	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297		
Cenário 16	11.5	1.6281448	1.0523E-06	0.000078084	0.0023108	0.000033095	0.002849661	0.002544474	4.7433E-06	5.6141E-05	1.174496	0.00027793	0.00176265	0.000182374	0.20302504	0.001347838	0.000314905	0.74362163	0.00267996	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	34.040708	0.1641284	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297		
Cenário 17	10.6	2.4272404	9.6345E-07	0.00023873	0.00129954	0.000067007	0.002618625	0.002228384	4.37344E-06	5.17133E-05	10.29997	0.002487858	0.00920314	0.001464689	0.18765935	0.001242373	0.000026386	0.6852938	0.001168762	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	31.376652	0.15136122	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297		
Cenário 18	5.9	1.3485056	5.36279E-07	0.0003473	0.000185641	0.000478718	0.00015736	0.000212952	2.43866E-06	2.87838E-05	5.7330204	0.001373619	0.00521684	0.000498819	0.1054477	0.000692915	0.000016156	0.8134252	0.000565537	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	17.464363	0.08428224	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297		
Cenário 19	5.1	1.165681	4.6353E-07	0.00030148	0.000129904	0.000180856	0.000413807	0.000180856	2.10387E-06	2.4881E-05	4.955641	0.00187365	0.00781911	0.000704835	0.090293744	0.0009774	0.000139654	0.3270508	0.000652329	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	15.06634	0.07282476	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297		
Cenário 20	7.3	1.668491	6.6353E-07	0.00042624	0.001466855	0.000592313	0.001803292	0.001580573	3.01143E-06	3.56139E-05	7.093378	0.00189662	0.006819214	0.001008077	0.1292439	0.00055597	0.000139654	0.4719308	0.000649092	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	21.058499	0.10423931	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	0.0001297	
Cenário 21	1.2	0.3855271	1.5452E-07	0.00010049	0.000034156	0.000013793	0.000041968	0.000032835	1.01225E-07	8.																										

APÊNDICE U – Programação computacional do modelo AM-HUB com indicadores de desempenho ambiental no software ProModel for Windows

Tempo: Minutos
Distância: Metros

* Locais *

Nome	Cap	Unidade	Estatísticas	Regras	Custo
FORNECEDOR_PLA	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
FORNECEDOR_PETG	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
FORNECEDOR_FITA	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1	1	12	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	Primeiro
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.1	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.2	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.3	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.4	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.5	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.6	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.7	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.8	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.9	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.10	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.11	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.12	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_2	1	2	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	Primeiro
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.1	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.2	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PLA	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
CORTE_LASER	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FOLHA_PETG	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FITA	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
MONTAGEM_FINAL	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PECA_TIPO_1	inf	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_PECA_TIPO_2	inf	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_VISOR	inf	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FITA_CORTADA	inf	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ESTOQUE_FACE_SHIELD	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
CORTE_DA_FITA	1	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_até_30_km	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	2	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	13	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
ACABAMENTO_PECA_TIPO_1	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUÇÃO	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_acima_de_30_km	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
DEMANDANTE_campus_Central	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Entrega_KIT	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
Descarte_de_peças	inf	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	
SAÍDA_DA_MONTAGEM	INF	1	Série de Tempo	O Mais Velho, ,	

* Paradas por relógio para Locais *

Loc	Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado	Desab	Lógica
IMPRESSORA_3D_TIPO_1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.3	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.4	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.5	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.6	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.7	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.8	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.9	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.10	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.11	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_1.12	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.1	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min
IMPRESSORA_3D_TIPO_2.2	2880 min	0	99	Não	Não	wait B(0.686, 1.01, 7.19, 11.8) min
	1200 min	0	99	Não	Não	wait 1.68+8.63*(1./((1./U(0.5,0.5))-1.))**(1./21.3) min
	10000 min	0	99	Não	Não	wait -804+G(2.38e+005, 0.00343) min

 * Entidades *

Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas	Custo
BOBINA_PLA	150	Série de Tempo	
FOLHA_PETG	150	Série de Tempo	
ROLO_DE_FITA	150	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_1	150	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_2	150	Série de Tempo	
FITA_CORTADA	150	Série de Tempo	
VISOR	150	Série de Tempo	
FACE_SHIELD	150	Série de Tempo	
LOTE_DE_ENTREGA	150	Série de Tempo	
ORDEN_DE_PRODUÇÃO	150	Série de Tempo	
ORDEN_DE_ENTREGA	150	Série de Tempo	
KIT_FILAMENTO_PEÇA_TIPO_1	50	Série de Tempo	
KIT_FILAMENTO_PEÇA_TIPO_2	50	Série de Tempo	
ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_1	50	Série de Tempo	
ORDEN_DE_PRODUÇÃO_TIPO_2	50	Série de Tempo	
LOTE_PEÇA_TIPO_1	50	Série de Tempo	
LOTE_PEÇA_TIPO_2	50	Série de Tempo	
LOTE_DE_ENTREGA_FS	50	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	50	Série de Tempo	
PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	50	Série de Tempo	

 * Redes de Caminho *

Nome	Tipo	T/S	De	Para	BI	String	Fator de Velocidade
Rede_entrega_PLA	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(0.507, 1.,35.2, 52)	
Rede_entrega_PETG	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(0.808, 1.26, 12.6, 21.4)	
Rede_entrega_Fita	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(0.14(22.5, 4.34)	
Rede_entrega_Face_Shield_até_3	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6)	
Rede_entrega_Face_Shield_acima	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(1.37, 0.982, 34.1, 320)	
Rede_entrega_Face_Shield_Campu	Passante	Tempo	R1	R2	B1	B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27)	

 * Interfaces *

Red	Nó	Local
Rede_entrega_PLA	R1	FORNECEDOR_PLA
	R2	Entrega_Kit
Rede_entrega_PETG	R1	ESTOQUE_FOLHA_PETG
	R2	FORNECEDOR_PETG
Rede_entrega_Fita	R1	ESTOQUE_FITA
	R2	FORNECEDOR_FITA
Rede_entrega_Face_Shield_até_3	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_até_30_km
Rede_entrega_Face_Shield_acima	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_acima_de_30_km
Rede_entrega_Face_Shield_Campu	R1	ESTOQUE_FACE_SHIELD
	R2	DEMANDANTE_Campus_Central

 * Recursos *

Nome	Unid	Rec Estatísticas	Ent Pesquis	Ent Pesquis	Caminho	Movimentação	Custo
veículo_de_entrega_de_PLA	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_PLA Base: R1 (Retornar)	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_de_PETG	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_PETG Base: R1	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_de_Fita	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_Fita Base: R1	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_Face_Shield	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_Face_Shield_até_3 Base: R2 (Retornar)	Vazio: 150 mpm Cheio: 150 mpm	
veículo_de_entrega_Face_Shield	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_Face_Shield_acima Base: R2 (Retornar)	Vazio: 50 mpm Cheio: 50 mpm	
entregador	1	Por Unidade Mais Próximo Mais Velha			Rede_entrega_Face_Shield_Campu Base: R2 (Retornar)	Vazio: 50 mpm Cheio: 50 mpm	

***** Processamento *****							
* Processamento *							

Processo			Roteamento				
Entidade	Local	Operação	B1	Saída	Destino	Regra	Lógica de Movimento
BOBINA_PLA	ESTOQUE_PLA	TEMPO_DE_ENTREGA_PLA=B(0.507, 1.,35.2, 52) wait 5 min Route 1 Route 2					
ORDEN_DE_PRODUCÃO	FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO		1	KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_1	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	Join 1	Move For 0.1 min
			2*	KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_2	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	Join 1	Move For 0.1 min
			1	ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_1	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	FIRST 1	Move For 0.1 min
			2*	ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_2	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	FIRST 1	Move For 0.1 min
ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_1	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1	LEAD_TIME_PECA_1=CLOCK(MIN) INÍCIO_DO_LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO=Clock(MIN) JOIN 1 KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_1 Inc PECAS_TIPO_1_IMPRESSAS,1 combine 2 wait 5.27+4.72*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)-0.133)/0.512))) min TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STAND_BY=5.27+4.72*(1./(1.+EXP(-(N(0.,1.)-0.133)/0.512))) CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1_STAND_BY=0.0021*TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STAND_BY					
			1	ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_1	IMPRESSORA_3D_TIPO_1	FIRST 1	Move For 0.1 min
ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_1	IMPRESSORA_3D_TIPO_1	wait B(0.507, 1.,302, 361) min TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMPRESSORA_TIPO_1= B(0.507, 1.,302, 361) Inc CONSUMO_DE_PLA_PECA_TIPO_1,98.58 VOC_pecas_tipo_1=TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMPRESSORA_TIPO_1*(0.160/320) Inc VOC_total,VOC_pecas_tipo_1 CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1=0.0021*TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMPRESSORA_TIPO_1 Inc CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO_TIPO_1,CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1+CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1_STAND_BY VARIACÃO_CO2_IMPRESSÃO_TIPO_1=1000*(0.000165*(CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1+CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_1_STAND_BY))					
PEÇA_TIPO_1	ACABAMENTO_PECA_TIPO_1	wait -2.05+M(6, 4.93) MIN Inc RESIDUOS_DE_PLA_PECA_TIPO_1,4.92					
			1	PEÇA_TIPO_1	ESTOQUE_PECA_TIPO_1	0.99 1	Move For 0.1 MIN
PEÇA_TIPO_1	ESTOQUE_PECA_TIPO_1		1	PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	Descarte_de_pecas	0.01	Move For 0.1 MIN
ORDEN_DE_ENTREGA	FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA		1	PEÇA_TIPO_1	ESTOQUE_FACE_SHIELD	FIRST 1	Move For 0.1 MIN
ORDEN_DE_ENTREGA	ESTOQUE_FACE_SHIELD	Join 1 FACE_SHIELD Combine 26 SAÍDA_DO_ESTOQUE=Clock(MIN)					
			1	LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_até_30_km	0.92 1	Move With veículo_de_entrega_Face_Shield_até_30_km Then FREE Inc ENTREGAS_REALIZADAS_até_30_km,1 Inc ENTREGAS_TOTAIS,1 Move With veículo_de_entrega_Face_Shield_acima_de_30_km Then FREE Inc ENTREGAS_REALIZADAS_acima_de_30_km,1 Inc ENTREGAS_TOTAIS,1 Move With entregador Then FREE
				LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_acima_de_30_km	0.08	
				LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_Campus_Central	0	
PEÇA_TIPO_1	MONTAGEM_FINAL	CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO=CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO_TIPO_1+CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO_TIPO_2 CONSUMO_ENERGIA_TOTAL=CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_CORTE+CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO CO2_PRODUCÃO=0.000165*CONSUMO_ENERGIA_TOTAL CED_PRODUCÃO=0.01095*CONSUMO_ENERGIA_TOTAL+2.0788 AQUECIMENTO_GLOBAL_PRODUCÃO=0.0003*CONSUMO_ENERGIA_TOTAL+0.1128 CHEGADA_NA_MONTAGEM=CLOCK(MIN) Join 1 PEÇA_TIPO_2 Join 1 VISOR Join 1 FITA_CORTADA wait B(0.97, 1.08, 0.66, 0.87) min Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_MONTADAS,1 TEMPO_DE_CICLO_DE_MONTAGEM=B(0.97, 1.08, 0.66, 0.87) LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO=Clock(MIN)-LEAD_TIME_PECA_1					
			1	FACE_SHIELD	SAÍDA_DA_MONTAGEM	FIRST 1	Move For 0.1 min
LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_até_30_km	Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_até_30_km, 26 CO2_DISTRIBUIÇÃO=(0.2031*(35/60)*B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6))+0.8885*0.000000007 Inc CO2_DISTRIBUIÇÃO_TOTAL,CO2_DISTRIBUIÇÃO CED_DISTRIBUIÇÃO=(2.983*(35/60)*B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6))-0.0044 Inc CED_TOTAL_DISTRIBUIÇÃO,CED_DISTRIBUIÇÃO AQUECIMENTO_GLOBAL_DISTRIBUIÇÃO=(0.2286*(35/60)*B(1.02, 0.891, 5.51, 46.6))+0.000000007 Inc AQUECIMENTO_GLOBAL_TOTAL_DISTRIBUIÇÃO,AQUECIMENTO_GLOBAL_DISTRIBUIÇÃO					
			1	FACE_SHIELD	SAÍDA_DA_MONTAGEM	FIRST 1	Move For 0.1 min
LOTE_DE_ENTREGA_FS	DEMANDANTE_Campus_Central	TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIELD_acima_de_30_km=B(1.37, 0.982, 34.1, 320) wait 1 DAY Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_Campus_Central,26 Inc ENTREGAS_REALIZADAS_até_30_km,1 TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIELD_Campus_Central=B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27) wait 1 DAY Inc QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENTREGUES_Campus_Central,26 Inc ENTREGAS_REALIZADAS_até_30_km,1 TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIELD_Campus_Central=B(0.943, 0.91, 1.53, 8.27)					
			1	FACE_SHIELD	EXIT	FIRST 1	Move For 0.1 min
ORDEN_DE_PRODUCÃO_TIPO_2	PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2	INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_2=CLOCK(MIN) JOIN 1 KIT_FILAMENTO_PECA_TIPO_2 Combine 13 Inc PECAS_TIPO_2_IMPRESSAS,13 Inc VOC_pecas_tipo_2,0.175 wait B(0.859, 0.914, 30.4, 39) min TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STAND_BY=B(0.859, 0.914, 30.4, 39) CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2_STAND_BY=0.0021*TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STAND_BY					
			1	LOTE_PECA_TIPO_2	IMPRESSORA_3D_TIPO_2	FIRST 1	Move For 0.1 min
LOTE_PECA_TIPO_2	IMPRESSORA_3D_TIPO_2	wait B(0.802, 1.25, 306, 414) min Inc CONSUMO_PLA_PECA_TIPO_2,118.83 TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMPRESSORA_TIPO_2=B(0.802, 1.25, 306, 414) VOC_pecas_tipo_2=TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMPRESSORA_TIPO_2*(0.160/350) Inc VOC_total,VOC_pecas_tipo_2 CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2=0.0021*TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMPRESSORA_TIPO_2 Inc CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO_TIPO_2,CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2+CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2_STAND_BY VARIACÃO_CO2_IMPRESSÃO_TIPO_2=1000*(0.000165*(CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2+CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA_TIPO_2_STAND_BY))					
			1	PEÇA_TIPO_2	ESTOQUE_PECA_TIPO_2	0.99 13	MOVE FOR 0.1 MIN
			1	PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	Descarte_de_pecas	0.01	MOVE FOR 0.1 MIN
PEÇA_TIPO_2	ESTOQUE_PECA_TIPO_2	Inc RESÍDUO_PLA_PECA_TIPO_2,1.31					
			1	PEÇA_TIPO_2	MONTAGEM_FINAL	Join 1	Move For 0.1 min
FOLHA_PETG	ESTOQUE_FOLHA_PETG	TEMPO_DE_ENTREGA_PETG=B(0.808, 1.25, 12.6, 21.4) wait 5 min					
			1	FOLHA_PETG	PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	FIRST 1	Move For 0.1 min
FOLHA_PETG	PREPARAÇÃO_CORTE_LASER	wait B(0.489, 0.873, 4.01, 6.85) min					
			1	FOLHA_PETG	CORTE_LASER	FIRST 3	Move For 0.1 min
FOLHA_PETG	CORTE_LASER	Início_do_corte=Clock(MIN) wait 1.65+IG(2.45, 0.34) min wait W(17.6, 1.02) min wait B(1.38, 1.24, 6.04, 8.92) min TEMPO_DE_CICLO_CORTE_LASER=Clock(MIN)-início_do_corte Inc CONSUMO_DE_PETG,0.62 Inc RESIDUOS_DE_PETG,0.095 CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER_STAND_BY=0.013*(17.6, 1.02) CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER=0.013*B(1.38, 1.24, 6.04, 8.92) VARIACÃO_CO2_CORTE=1000*(0.000165*(0.013*B(1.38, 1.24, 6.04, 8.92))+0.013*(17.6, 1.02)) Inc CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_CORTE,CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER+CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER_STAND_BY					
			1	VISOR	MONTAGEM_FINAL	Join 1	Move For 0.1 min
VISOR	ESTOQUE_VISOR		1	VISOR	MONTAGEM_FINAL	Join 1	Move For 0.1 min
ROLO_DE_FITA	ESTOQUE_FITA	TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FITA=10.1+(22.5, 4.34) wait 5 min					
			1	ROLO_DE_FITA	CORTE_DA_FITA	FIRST 1	Move for 0.1 min
ROLO_DE_FITA	CORTE_DA_FITA	wait 3 min TEMPO_DE_CICLO_CORTE_DA_FITA=3 Inc CONSUMO_DE_FITA,96					
			1	FITA_CORTADA	ESTOQUE_FITA_CORTADA	FIRST 96	Move for 0.1 min
			1	FITA_CORTADA	MONTAGEM_FINAL	Join 1	Move for 0.1 min
FITA_CORTADA	ESTOQUE_FITA_CORTADA						
BOBINA_PLA	Entrega_kit	Inc ENTREGAS_PLA,1					
			1	BOBINA_PLA	ESTOQUE_PLA	FIRST 500	move for 0.1 min
PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	Descarte_de_pecas	Inc PECAS_DESCARTADAS_TIPO_2,1 Accum 10 wait 10 min					
			1	PEÇA_TIPO_2_REJEITADA	EXIT	FIRST 1	
PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	Descarte_de_pecas	Inc PECAS_DESCARTADAS_TIPO_1,1 Accum 10 wait 10 min					
			1	PEÇA_TIPO_1_REJEITADA	EXIT	FIRST 1	
FACE_SHIELD	SAÍDA_DA_MONTAGEM		1	FACE_SHIELD	ESTOQUE_FACE_SHIELD	Join 1	

```

*****
* Chegadas
*****
Entidade Local QTD. por Ve: Primeira vez Ocorrências Freqüência Lógica
-----
BOEINA_PLA Entrega_kit 1 Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM Inf 2 wk
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 2938 Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 59 Mon, Mar 02 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 4248 Wed, Apr 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 851 Mon, May 04 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 237 Mon, Jun 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 329 Wed, Jul 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 223 Mon, Aug 03 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 3792 Tue, Sep 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 110 Thu, Oct 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 2359 Tue, Nov 03 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 0 Tue, Dec 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 0 Mon, Jan 04 2021 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_PRODUCÃO FILA_DE_ORDENS_DE_PRODUCÃO 1126 Mon, Feb 01 2021 @ 08:00 AM 1
FOLHA_PETG ESTOQUE_FOLHA_PETG 29 0 16 2 wk
ROLO_DE_FITA ESTOQUE_FITA 5 0 34 1 wk
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 2902 Wed, Apr 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 1548 Mon, May 04 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 914 Mon, Jun 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 1589 Wed, Jul 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 2928 Mon, Aug 03 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 2284 Tue, Sep 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 1288 Thu, Oct 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 800 Tue, Nov 03 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 600 Tue, Dec 01 2020 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 800 Mon, Jan 04 2021 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 300 Mon, Feb 01 2021 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 1816 Thu, Apr 01 2021 @ 08:00 AM 1
ORDEM_DE_ENTREGA FILA_DE_ORDENS_DE_ENTREGA 625 Mon, May 03 2021 @ 08:00 AM 1
*****
* Designações de Turno
*****
Localis... Recursos... Arquivo de Calendário... Prioridades... Desabilitar Lógica...
-----
CORTE_DA_FITA entregador c:\users\10082158\desktop\@_t 99,99,99,99 Não
ESTOQUE_FACE_SHIELD veículo_de_entrega_de_fita
ESTOQUE_FITA veículo_de_entrega_de_petg
ESTOQUE_FITA_CORTADA veículo_de_entrega_de_pla
ESTOQUE_FOLHA_PETG veículo_de_entrega_face_shield
ESTOQUE_PLA veículo_de_entrega_shield
ESTOQUE_VISOR
FORNECEDOR_FITA
FORNECEDOR_PETG
FORNECEDOR_PLA
MONTAGEM_FOLHA
Entrega_kit
IMPRESSORA_3D_TIPO_1 c:\users\10082158\desktop\@_t 99,99,99,99 Não
IMPRESSORA_3D_TIPO_2
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_1
PREPARAÇÃO_IMPRESSORA_TIPO_2
ACABAMENTO_PECA_TIPO_1
ESTOQUE_PECA_TIPO_1
ESTOQUE_PECA_TIPO_2
CORTE_LASER Calendário corte.pmcsl 99,99,99,99 Não
CORTE_DA_FITA
*****
* Atributos
*****
Nome Tipo Classificação
-----
LEAD_TIME_PECA_1 Real Entidade
*****
* Variáveis (globais)
*****
Nome Tipo Valor Inicial Estatísticas
-----
TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_1_IMP Real 0 Série de Tempo
PECAS_TIPO_1_IMPRESSAS Inteiro 0 Série de Tempo
PECAS_TIPO_2_IMPRESSAS Inteiro 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_PECA_TIPO_2_IMP Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_CORTE_LASER Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_CORTE_DA_FITA Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_CICLO_DE_MONTAGEM Real 0 Série de Tempo
LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO Real 0 Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_NON Inteiro 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_PLA Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_PETG Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FITA Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DO_FACE_SHIEL Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_PLA_PECA_TIPO_1 Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_PETG Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_FITA Inteiro 0 Série de Tempo
RESÍDUOS_DE_PLA_PECA_TIPO_1 Real 0 Série de Tempo
RESÍDUOS_DE_PETG Real 0 Série de Tempo
MOMENTO_DE_SAÍDA_DO_FORNECEDOR Real 0 Série de Tempo
INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_1 Real 0 Série de Tempo
CHEGADA_NA_MONTAGEM Real 0 Série de Tempo
SAÍDA_DO_ESTOQUE Real 0 Série de Tempo
INÍCIO_DO_LEAD_TIME_DE_PRODUCÃO Real 0 Série de Tempo
TEMPO_DE_ENTREGA_DE_FACE_SHIEL Real 0 Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENT Inteiro 0 Série de Tempo
QUANTIDADE_DE_FACE_SHIELDS_ENT Inteiro 0 Série de Tempo
INÍCIO_IMPRESSÃO_TIPO_2 Real 0 Série de Tempo
MOMENTO_DE_SAÍDA_DO_FORNECEDOR Real 0 Série de Tempo
TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_1_EM_STA Real 0 Série de Tempo
INÍCIO_TEMPO_STAND_BY Real 0 Série de Tempo
TEMPO_IMPRESSORA_TIPO_2_EM_STA Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_IMPRESSORA Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_DE_ENERGIA_CORTE_LASER Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_PLA_PECA_TIPO_2 Real 0 Série de Tempo
RESÍDUO_PLA_PECA_TIPO_2 Real 0 Série de Tempo
ENTREGAS_PLA Inteiro 0 Série de Tempo
PECAS_DESCARTADAS_TIPO_2 Inteiro 0 Série de Tempo
PECAS_DESCARTADAS_TIPO_1 Inteiro 0 Série de Tempo
Início do corte Real 0 Série de Tempo
INÍCIO_PREPARAÇÃO_1 Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_ENERGIA_TOTAL_IMPRESSÃO Real 0 Série de Tempo
CONSUMO_ENERGIA_TOTAL Real 0 Série de Tempo
VOC_pecas_tipo_1 Real 0 Série de Tempo
VOC_pecas_tipo_2 Real 0 Série de Tempo
VOC_totais Real 0 Série de Tempo
AQUECIMENTO_GLOBAL_PRODUCÃO Real 0 Série de Tempo
AQUECIMENTO_GLOBAL_DISTRIBUIÇÃO Real 0 Série de Tempo
CED_PRODUCÃO Real 0 Série de Tempo
CED_DISTRIBUIÇÃO Real 0 Série de Tempo
CO2_PRODUCÃO Real 0 Série de Tempo
CO2_DISTRIBUIÇÃO Real 0 Série de Tempo
VARIACÃO_CO2_IMPRESSÃO_TIPO_1 Real 0 Série de Tempo
VARIACÃO_CO2_IMPRESSÃO_TIPO_2 Real 0 Série de Tempo
VARIACÃO_CO2_CORTE Real 0 Série de Tempo
ENTREGAS_REALIZADAS_ATE_30_KM Inteiro 0 Série de Tempo
CO2_DISTRIBUIÇÃO_TOTAL Real 0 Série de Tempo
AQUECIMENTO_GLOBAL_TOTAL_DISTR Real 0 Série de Tempo
CED_TOTAL_DISTRIBUIÇÃO Real 0 Série de Tempo
ENTREGAS_REALIZADAS_ATE_30_KM Inteiro 0 Série de Tempo
ENTREGAS_TOTAIS Inteiro 0 Série de Tempo
*****
* Arquivos Externos
*****
Nome Tipo Nome de Arquivo Prompt
-----
(null) Turno c:\users\10082158\desktop\@_tese@21denovembro\Calendário operadores.pmcsl
(null) Turno c:\users\10082158\desktop\@_tese@21denovembro\Calendário impressoras.pmcsl
(null) Turno Calendário corte.pmcsl

```


APÊNDICE V – Modelo computacional DES-LCA

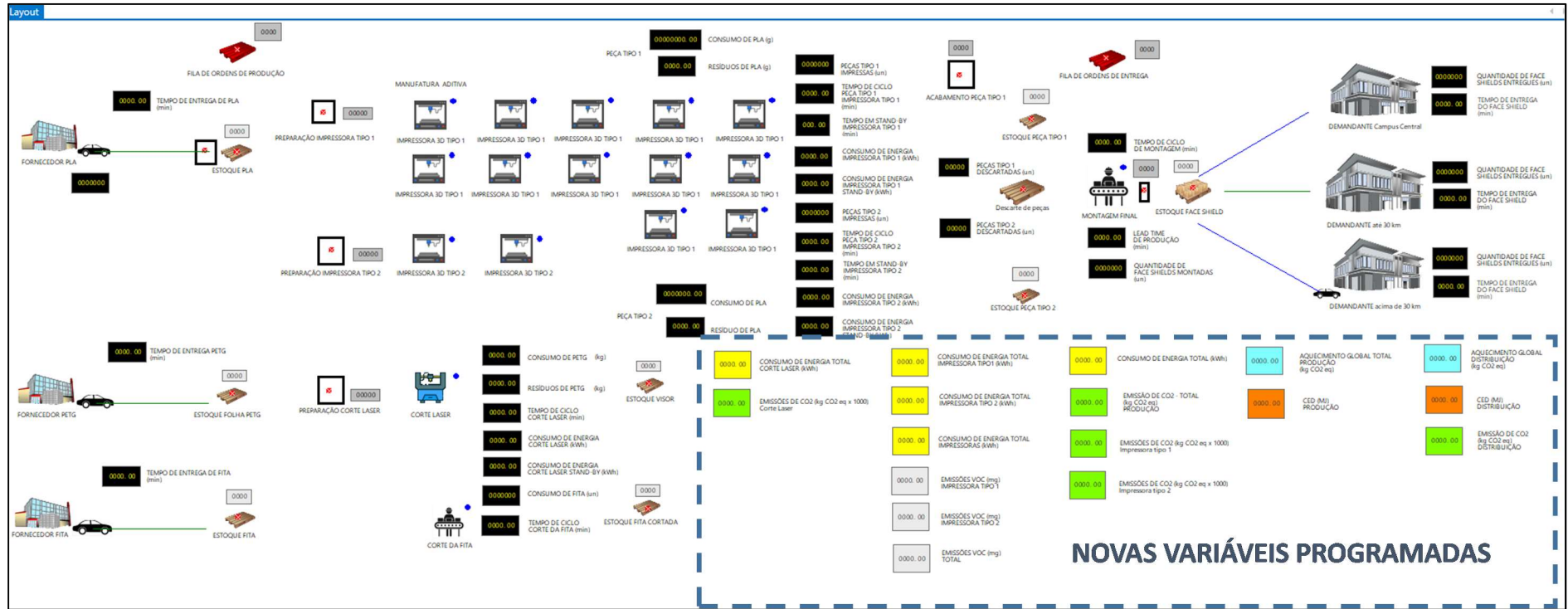


Figura 8.6 – Layout do modelo computacional DES-LCA

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do software ProModel for Windows (2024)

APÊNDICE W – Amostra de dados, distribuição de probabilidade e histograma dos tempos de entrega de face shields na configuração AM-CLUSTER

Tabela 8.25 – Amostra de dados de distância e tempo utilizados para definição da distribuição de probabilidade dos tempos de entrega na configuração AM-CLUSTER

Distância (km)	Tempo (min)	Distância (km)	Tempo (min)
1,2	2,06	4,7	8,06
1,7	2,91	5,1	8,74
1,8	3,09	5,9	10,11
1,9	3,26	6,6	11,31
2,1	3,60	6,7	11,49
2,3	3,94	6,8	11,66
2,4	4,11	7,3	12,51
2,5	4,29	8	13,71
2,9	4,97	8,5	14,57
3	5,14	8,6	14,74
3,1	5,31	10,4	17,83
3,2	5,49	10,6	18,17
3,3	5,66	11,5	19,71
3,5	6,00	11,8	20,23
3,9	6,69	12	20,57
4	6,86	12,1	20,74
4,2	7,20	13,5	23,14
4,3	7,37	14,6	25,03
4,6	7,89	15,4	26,40

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do Stat Fit (2024)

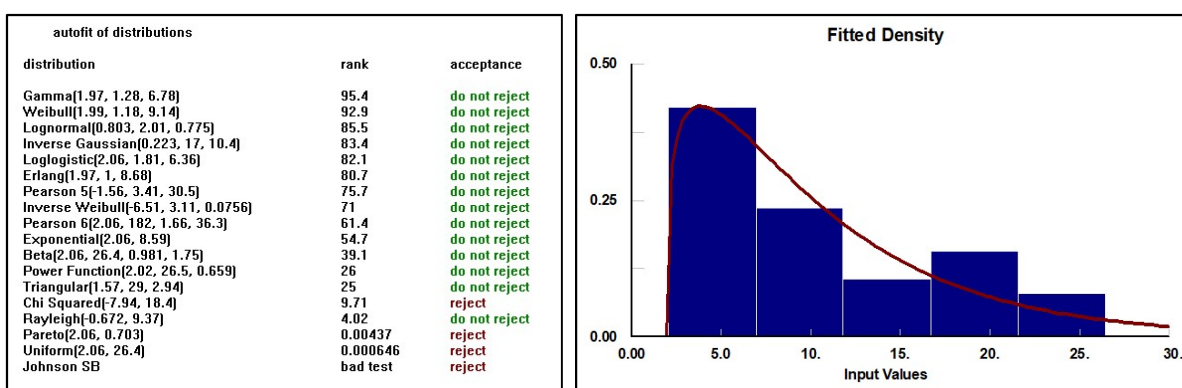


Figura 8.7 – Distribuições de probabilidade testadas para tempos de entrega de *face shields* e histograma da amostra com distribuição de probabilidade *Gama*

Fonte: Elaborada pelo autor com uso do Stat Fit (2024)



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Av. Ipiranga, 6681 – Prédio 1 – Térreo
Porto Alegre – RS – Brasil
Fone: (51) 3320-3513
E-mail: propesq@pucrs.br
Site: www.pucrs.br