

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – PPGEPS

FABRICIO LEON GARCIA

**COMPARAÇÃO ENTRE A MOLDAGEM POR INJEÇÃO E A MANUFATURA  
ADITIVA UTILIZANDO MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS: UM  
ESTUDO DE ACV**

Sorocaba  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
CAMPUS DE SOROCABA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – PPGEPS

FABRICIO LEON GARCIA

**COMPARAÇÃO ENTRE A MOLDAGEM POR INJEÇÃO E A MANUFATURA  
ADITIVA UTILIZANDO MATERIAIS POLIMÉRICOS RECICLADOS: UM  
ESTUDO DE ACV**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris

Coorientação: Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva

Sorocaba  
2018

Garcia, Fabricio Leon

COMPARAÇÃO ENTRE A MOLDAGEM POR INJEÇÃO E A  
MANUFATURA ADITIVA UTILIZANDO MATERIAIS POLIMÉRICOS  
RECICLADOS: UM ESTUDO DE ACV / Fabricio Leon Garcia. -- 2018.  
105 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Virgínia Aparecida da Silva Moris

Banca examinadora: Sandro Donnini Mancini; Andréa Oliveira Nunes

Bibliografia

1. Avaliação do Ciclo de Vida . 2. Manufatura Aditiva. 3. Performance  
Ambiental. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

### Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Fabricio Leon Garcia, realizada em 06/04/2018:

*VM*

---

Profa. Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris  
UFSCar

*Sandro Mancini*

---

Prof. Dr. Sandro Dennini Mancini  
UNESP

*não assinou*

---

Profa. Dra. Andréa Oliveira Nunes  
UFRN

**Dedico este trabalho a minha companheira, Dudi,  
e aos meus pais, Vanderlei e Marli.**

## AGRADECIMENTOS

A minha companheira, Dudi Maria Ribeiro de Camargo, pelo amor, companheirismo e apoio incondicional nessa longa jornada.

Agradeço aos meus pais, Carlos Vanderlei Garcia e Marli Leon Garcia, por serem minha base e meu alicerce, meus primeiros professores e meus eternos heróis.

Aos Professores Virgínia Aparecida da Silva Moris e Diogo Aparecido Lopes Silva que me orientaram durante todo este projeto e, sem os quais, não seria possível a realização do mesmo. Obrigado pela atenção, paciência, tempo e por dividir seus conhecimentos para que eu conseguisse trilhar esse caminho.

Aos colegas do LECMat, mestrandos e pós doutorandos, que sempre me auxiliaram e que sempre estavam disponíveis para um café e um pouco de ciência.

Ao amigo Mateus Sant'anna de Sousa Gomes, pela parceria de todas as horas, por aguentar minhas lamentações e ser um ombro amigo mesmo estando longe.

Aos amigos de São Carlos, Flávia Oliveira, Luis Johansen, Matheus Gaboardi, Erich Sigolo, Pedro Tortoza, Alexandre Cannataro, Vitor Monteiro e Fernando Madia, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos de colégio, Marco Aurélio e Vinicius Nunes, que sempre estiveram por perto.

A empresa que disponibilizou os dados para que este trabalho pudesse ser realizado, em especial agradeço a Mariane Martins e a Cristina Belli que me auxiliaram para que os dados pudessem ser coletados.

Agradeço a Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade de fazer parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Campus-Sorocaba.

A CAPES, pela bolsa concedida durante a realização deste projeto.

A todos os meus professores, obrigado pelo conhecimento transmitido e por me guiarem até aqui.

A todos as pessoas, amigos e familiares cujos nomes não estão citados, mas que fazem parte da minha vida e me apoiaram até esse momento.

A todos o meu mais sincero muito obrigado.

...

I'm strong on the surface  
Not all the way through  
I've never been perfect  
But neither have you

So if you're asking me  
I want you to know

When my time come  
Forget the wrong that I've done  
Help me leave behind some  
Reasons to be missed.  
And don't resent me  
When you're feeling empty  
Keep me in your memory  
Leave out all the rest  
Leave out all the rest

**(Leave Out All The Rest - Linkin Park)**

## RESUMO

GARCIA, Fabricio Leon. **Comparação entre a moldagem por injeção e a manufatura aditiva utilizando materiais poliméricos reciclados: um estudo de ACV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba, 2018.

Com o aumento da preocupação da sociedade em relação aos impactos ambientais gerados por processos produtivos e produtos, cresce a necessidade de estudos que analisem novas alternativas tecnológicas de produção, rumo a produção sustentável. Com o avanço tecnológico recente, merece atenção a manufatura aditiva (MA), que vem ganhando cada vez mais espaço nas indústrias por conta da possibilidade de trabalhar com peças de diferentes formas geométricas, e de distribuir a produção ao longo da cadeia de valor. Nesse contexto foi realizada uma análise comparativa entre dois processos de manufatura, um convencional (MC), a moldagem por injeção, e outro aditivo (*Fused Deposition Modelling* (FDM)), para a avaliação dos seus respectivos potenciais impactos ambientais, identificando os principais *hotspots* ambientais e analisando a influência do preenchimento das peças produzidas através da MA na performance ambiental do processo. Foi adotada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que tem um caráter holístico, e que permite avaliar de maneira robusta a performance ambiental de um processo ou produto. Para realização do estudo foram produzidas peças de Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) reciclado proveniente de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) em ambos os processos avaliados. Os resultados obtidos indicam um menor impacto ambiental da MA quando deseja-se produzir um tamanho de lote inferior a 14 peças, sendo que a partir de 50 peças a MC gerou menor impacto, tanto para o potencial de aquecimento global (PAG) quanto para o *Cumulative energy demand* (CED). Visando uma melhor análise dos processos foi adotada a metodologia UPLCI (*Unit Process Life Cycle Inventory*), o que resultou em uma avaliação dos impactos estratificada por cada modo de operação/etapa do processo nos equipamentos estudados. Para a MA a etapa de impressão foi a que mais contribuiu para a geração de impactos. Na MC os maiores responsáveis por gerar impactos foram a etapa de injeção, seguida pelo consumo de matéria prima. Foram realizados ensaios mecânicos de tração com as peças obtidas via MA com diferentes preenchimentos (25%, 50%, 75% e 100%), sendo possível observar que, mesmo com preenchimento de 100%, as peças impressas apresentaram uma performance mecânica abaixo das confeccionadas a partir da MC. Além disso, quando analisados os valores obtidos para o limite de resistência a tração (LRT) e o impacto gerado (PAG) para cada preenchimento das peças produzidas via MA observou-se que, as peças com 100% de preenchimento obtiveram a melhor relação entre propriedade mecânica e menor impacto ambiental.

**Palavras chave:** Avaliação do ciclo de vida (ACV), Manufatura aditiva (MA), Moldagem por injeção, *Fused Deposition Modelling* (FDM), Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE).

## ABSTRACT

GARCIA, Fabricio Leon. **A comparison between injection molding and additive manufacturing using recycled polymer: a LCA study.** MSc Dissertation (Production Engineering) – Federal University of São Carlos, Sorocaba, 2018.

With society increasing concern regarding the environmental impacts generated by production processes and products, it has been growing the necessity for studies that analyze new technological alternatives of the manufacturing towards cleaner production. With the recent technological advance, additive manufacturing (AM) deserves some attention, which has been gaining space in the industries due to the possibility of working with pieces of different geometric shapes, and distributing the production along the value chain. In this context, a comparative analysis was performed between two manufacturing processes, one conventional (CM), injection molding, and another additive (Fused Deposition Modelling (FDM)), to evaluate their potential environmental impacts, identifying the main environmental hotspots and analyzing the influence of the infill through the AM on the environmental performance of the process. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was adopted, which has an holistic profile, and it allows a powerful evaluation of the environmental performance of a process or product. In order to carry out the study, pieces of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) recycled from waste of electrical and electronic equipment (WEEE) were produced on both processes. The results indicate a lower environmental impact of the AM when it is aimed to produce a batch size smaller than 14 pieces, and above 50 pieces the CM generated less impact, for the global warming potential (GWP) and Cumulative energy demand (CED). In order to better analyze the processes, the UPLCI (Unit Process Life Cycle Inventory) methodology was adopted, which resulted in an impact assessment layered by each mode of operation / process step of the equipment studied. For the AM, the printing stage was the one that contributed the most for generating impacts. In CM, the main factors responsible for generating impacts were the injection phase, followed by the consumption of raw material. Mechanical tensile tests were carried out with the pieces obtained by the AM with different infills (25%, 50%, 75% and 100%). It was possible to observe that, even with 100% filling, the printed parts presented a mechanical performance lower than those made from the CM. In addition, when the values obtained for the tensile strength and the generated impact (GWP) were analyzed for each infill of the pieces obtained by the AM, it was observed that the pieces with 100% of filling obtained the best relation between better mechanical properties and lower environmental impact.

**Keywords:** Life cycle assessment (LCA) , Additive manufacturing (AM), Injection molding, Fused Deposition Modelling (FDM), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), Waste electrical and electronic equipment (WEEE).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo Vat Photopolymerisation do tipo SLA.....	12
Figura 2 - Esquema do processo Material Jetting.....	13
Figura 3 - Esquema do processo Binder Jetting .....	14
Figura 4 - Esquema do processo Fused Deposition Modelling (FDM).....	14
Figura 5 - Esquema do processo Selective Laser Sintering (SLS).....	15
Figura 6 - Esquema do processo Directed Energy Deposition.....	16
Figura 7 - Esquema do processo Sheet Lamination .....	16
Figura 8 - Estágio do Ciclo de Vida .....	18
Figura 9 - Estrutura de avaliação de ciclo de vida.....	22
Figura 10 - Exemplo de sistema de produto .....	24
Figura 11 - Exemplo de um conjunto de processos elementares.....	24
Figura 12 - Exemplo de fronteira de um sistema de produto .....	26
Figura 13 - Procedimentos para análise de inventário.....	29
Figura 14 - Elementos da fase de AICV.....	30
Figura 15 - Procedimentos detalhado da metodologia RBS.....	35
Figura 16 - Evolução das publicações sobre performance ambiental e ACV em manufatura aditiva .....	38
Figura 17 - Peça utilizada para o estudo comparativo entre manufatura convencional e aditiva .....	49
Figura 18 - Comparativo entre os diferentes preenchimentos das peças confeccionadas via MA.....	50
Figura 19 - Sistemas de produto estudados .....	51
Figura 20 - Imagem do picador na planta da empresa do estudo de caso .....	52
Figura 21 - Equipamento de moldagem por injeção (injetora) utilizado no estudo de caso ....	52
Figura 22 - Equipamento que realiza o bobinamento dos filamentos após a extrusão.....	53
Figura 23 - Impressora 3D utilizada para o estudo de caso.....	54
Figura 24 - Fronteira do sistema considerando a manufatura convencional .....	55
Figura 25 - Fronteira do sistema considerando a manufatura aditiva .....	55
Figura 26 - Amperímetro alicata utilizado para aquisição de dados .....	57
Figura 27 - Potencial de aquecimento global - Manufatura aditiva .....	68
Figura 28 - Potencial de aquecimento global - Manufatura convencional .....	69
Figura 29 - Comparativo entre o PAG da manufatura convencional e aditiva.....	70

Figura 30 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima na geração de PAG da MA .....	72
Figura 31 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima na geração de PAG da MC .....	73
Figura 32 - Cumulative energy demand para a Manufatura Aditiva.....	75
Figura 33 - Cumulative energy demand para a Manufatura Convencional.....	75
Figura 34 - Comparativo entre o CED da manufatura convencional e aditiva.....	76
Figura 35 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MA.....	77
Figura 36 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MC.....	77
Figura 37 - Propriedades mecânicas das peças impressas e injetadas.....	80
Figura 38 - Visão frontal e lateral da fratura do corpo de prova produzido através da MA após ensaio de tração .....	80
Figura 39 - Visão frontal e lateral da fratura do corpo de prova produzido através da MC após ensaio de tração .....	81
Figura 40 - Indicador de Ecoeficiência mecânica em função do preenchimento das peças geradas pela MA.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais bancos de dados para ACV .....	32
Tabela 2 – Principais softwares de ACV .....	33
Tabela 3 - Principais métodos AICV.....	34
Tabela 4 - Resultados de consumo de energia da MA encontrados nos artigos da amostra ....	41
Tabela 5 - Revisão dos artigos que utilizam ACV na avaliação da performance ambiental da MA.....	45
Tabela 6 - Modos de operação e distribuição média relativa do tempo - Manufatura Convencional.....	60
Tabela 7 - Resultado da análise de inventário para o processo de manufatura convencional ..	61
Tabela 8 - Modos de operação e distribuição média relativa do tempo - Manufatura Aditiva	63
Tabela 9- Resultado da análise de inventário para o processo de manufatura aditiva .....	64
Tabela 10 - Comparação entre o potencial de aquecimento potencial da manufatura convencional e aditiva .....	67
Tabela 11 - Comparação entre os valores gerados pela análise do CED da manufatura convencional e aditiva .....	74
Tabela 12 - Revisão dos artigos que avaliaram a performance ambiental da MA .....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CM	<i>Conventional Manufacturing</i>
EEE	Equipamento Elétrico e Eletrônico
FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>
GWP	<i>Global Warming Potencial</i>
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCI	<i>Life Cycle Inventory</i>
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment</i>
LCM	<i>Life Cycle Management</i>
LRT	Limite de Resistência a Tração
MA	Manufatura Aditiva
MC	Manufatura Convencional
ONG	Organização Não Governamental
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PB	Polibutadieno
PC	Policarbonato
PET	Polietileno Tereftalado
PLA	Poliácido Láctico
PP	Polipropileno
RBS	Revisão Bibliométrica Sistemática

REEE	Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico
SAN	Acrilonitrila de Estireno
SEC	<i>Specific Energy Consumption</i>
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SLA	Estereolitografia
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
UPLCI	<i>Unit Process Life Cycle Inventory</i>
WEEE	<i>Waste of Electrical and Electronic Equipment</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	8
1.1	Objetivos gerais e específicos	9
1.1.1	Objetivo geral	9
1.1.2	Objetivos específicos	9
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	10
2.1	Manufatura	10
2.1.1	Origem e definição	10
2.1.2	Manufatura Convencional	10
2.1.3	Manufatura aditiva	11
	Classificação e equipamentos	12
2.2	Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	17
2.3	Avaliação de ciclo de vida (ACV)	17
2.3.1	Aplicações da ACV e suas limitações	19
2.3.2	Metodologia da ACV	21
2.3.3	Bancos de dados e <i>softwares</i> de ACV	31
2.3.4	Métodos de avaliação de impactos	33
2.3.5	Performance ambiental e ACV em manufatura aditiva	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	48
3.1	Definição de objetivo e escopo	48
3.1.1	Objetivo	48
3.1.2	Função do produto	49
3.1.3	Unidade funcional	49
3.1.4	Fluxo de referência	49
3.1.5	Sistema de produto	50
3.1.6	Fronteira do sistema de produto	54
3.1.7	Requisitos de qualidade dos dados	56
3.1.8	Limitações	56
3.1.9	Tipo e formato do relatório	57
3.2	Análise de Inventário do ciclo de vida (ICV)	57
3.2.1	Inventário para o sistema de manufatura convencional	60

3.2.2	Inventário para o sistema de manufatura aditiva .....	62
3.3	Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) .....	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>67</b>
4.1	Potencial de aquecimento global (PAG) .....	67
4.2	Cumulative energy demand (CED) .....	73
4.3	Análise dos ensaios mecânicos de tração .....	78
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A</b>	.....	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da conscientização de empresas, órgãos governamentais e da população em geral sobre a importância de proteger o meio ambiente, cresce a necessidade do desenvolvimento de estudos e técnicas para melhor avaliar os impactos ambientais causados por processos e produtos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das ferramentas que possibilitam identificar os impactos ambientais e quais são mais relevantes, permitindo assim, uma ação dos tomadores de decisão para que esses impactos sejam mitigados, sendo essa uma das mais bem estabelecida e melhor desenvolvida ferramenta para avaliação ambiental de um produto ou processo (NESS et al., 2007). Devido a essas características, a ACV torna-se um instrumento importante para a escolha de tecnologias de produção, matéria prima, entre outras variáveis que afetam diretamente os impactos causados pelos processos de manufatura.

O processo de manufatura aditiva (MA), ou impressão 3D como é comercialmente conhecido, vem ganhando cada vez mais adeptos devido à facilidade, rapidez e custos reduzidos para a construção de peças piloto em relação aos métodos de manufatura convencionais (MC) (LAN, 2009). A utilização da MA pela indústria nos setores de engenharia, P&D e por empresas do tipo *startups* tem crescido bastante, pois possibilita transformar os desenhos computacionais em 3D (CAD) em peças sem a necessidade de moldes ou outras etapas de pré-fabricação (UPCRAFT; FLETCHER, 2003). Devido a intensificação na utilização da MA em detrimento a outros métodos de MC como a moldagem por injeção, estudos sobre os impactos ambientais causados por esse processo tornam-se relevantes, afim de determinar quais parâmetros e variáveis influenciam na decisão para utilização da melhor tecnologia.

Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo compreender melhor as diferenças entre as manufaturas aditiva e convencional, do ponto de vista dos impactos ambientais, quando utilizados como matéria prima materiais reciclados provenientes da reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Não foram identificados pelos autores outros trabalhos que fazem essa análise comparativa entre a MA e MC utilizando matéria prima reciclada e, devido ao aumento na utilização do processo de manufatura aditiva, é relevante entender quais implicações seu uso pode causar ao meio ambiente e a sociedade.

Por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), foram determinados os impactos ambientais associados aos processos de manufatura convencional (moldagem por injeção) e aditiva, comparando os dois processos, utilizando como matéria prima material reciclado. Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um estudo de caso em uma empresa situada na

região de Sorocaba/SP, que disponibilizou os dados de manufatura convencional e aditiva. Essa empresa atua com soluções sustentáveis voltada ao mercado de equipamento elétricos e eletrônicos (EEE) atuando na logística reversa e processamento dos materiais de maneira a reinserir na cadeia produtiva o material reciclado. A empresa processou em 2016 cerca de 1.800t de REEE, reinserindo no mercado 110.000 kg de ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), além de Poliestireno de alto impacto (HIPS) e Polipropileno (PP). Sendo o ABS reciclado um dos principais produtos comercializados pela empresa houve interesse no desenvolvimento de filamentos de ABS reciclado para o mercado de MA de forma a agregar valor ao material produzido. Dessa forma em conjunto com a empresa foram desenvolvidos os filamentos de ABS reciclado utilizados para elaboração deste estudo, porém informações relativas a confecção dos filamentos reciclados não constam neste trabalho devido ao acordo de confidencialidade firmado junto a empresa.

## **1.1 Objetivos gerais e específicos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi realizar uma análise comparativa, por meio de um estudo de ACV, entre processos de manufatura convencional (moldagem por injeção) e aditiva (*Material Extrusion/ Fused Deposition Modelling*) utilizando o ABS reciclado, visando quantificar e avaliar os impactos ambientais causados por cada um destes processos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Quantificar os impactos ambientais identificados pela manufatura convencional e aditiva;
- Avaliar a influência do preenchimento nas peças produzidas por meio da manufatura aditiva no impacto ambiental gerado pelo processo;
- Identificar os principais *hotspots* no ciclo de vida dos processos estudados;
- Realizar ensaios mecânicos de tração nas diferentes peças produzidas por meio da manufatura aditiva e convencional, a fim de comparar os resultados e relacionar as características mecânicas com os impactos ambientais.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Manufatura**

#### **2.1.1 Origem e definição**

A palavra manufatura foi ouvida pela primeira vez na Inglaterra em meados do século XVI e tem origem no Latin *manu factus* que significa “feito a mão” (KALPAKJIAN, 2001). Em meados de 1700 surge o verbo manufaturar, que é definido por Groover (2007) como a aplicação de processos mecânicos ou químicos para alterar a geometria, propriedades e aparência de uma matéria prima, de forma a transformá-la em peças ou produtos. A manufatura também inclui os processos que conectar múltiplas peças de forma a construir um produto mais complexo e, do ponto de vista econômico, pode ser definida como a transformação de materiais em itens de maior valor agregado (GROOVER, 2007).

Até a primeira revolução industrial, que se deu na Inglaterra nos anos 1750, a maioria das peças eram feitas de forma extremamente manual e somente por volta de 1900, com a segunda revolução industrial, é que teve início a mecanização dos processos, dando a manufatura os primeiros aspectos de como a conhecemos hoje (KALPAKJIAN, 2001). Processos de manufatura como a usinagem, prensagem e etc. se desenvolveram aos longos dos anos, primeiro com a utilização do vapor d’água e depois com a eletrificação dos equipamentos (GROOVER, 2007). A esses métodos de manufatura que se desenvolveram desde o início da indústria dá-se o nome de manufatura convencional, que contempla processos tais como: moldagem por injeção, moldagem por sopro, fundição, forjamento, usinagem e etc. (HUANG et al., 2016).

#### **2.1.2 Manufatura Convencional**

Dentre os processos de manufatura convencional que utilizam materiais poliméricos como matéria prima pode-se destacar a moldagem por injeção, sendo esse processo responsável pelo consumo de 32% em peso de todo plástico produzido no mundo (ROSATO; ROSATO; ROSATO, 2002). A moldagem por injeção é o processo de produzir objetos através da injeção de matéria prima sob pressão dentro de um molde (JOHANNABER, 1994). O processo de moldagem por injeção é o mais utilizado pela indústria de plásticos. Dessa forma, é também um dos mais utilizados quando deseja-se fazer comparações entre a manufatura convencional e aditiva, tendo sido utilizado por diversos autores, tais como Barros e Zwolinski (2016), Chen et al. (2015), Kianian e Larsson (2015) e Kreiger e Pearce (2013).

Segundo Mianehrow e Abbasian (2017) uma prensa injetora consiste em um sistema de injeção, que faz a introdução do material e seu aquecimento, e de um molde, que contém uma prensa para que o material pronto seja retirado após o término do processo (Figura 1). Existem tipos diferentes de equipamentos de moldagem por injeção, dependendo do tipo de sistema motriz, podendo ser do tipo hidráulico, híbrido ou elétrico (ELDUQUE et al., 2015). Independente da tecnologia motriz utilizada toda injetora executa algumas tarefas essenciais durante o processo: (a) *pasticizing*: Aquecimento do material até a sua fusão, (b) Injeção: transferência do material sob pressão e à volume controlado para dentro do molde, (c) *afterfilling*: manutenção da injeção do material sob pressão para prevenir o retorno do material injetado e compensar a redução do volume do material durante o resfriamento, (d) resfriamento: resfriamento do material injetado até o ponto em que o material possa ser retirado do molde e (e) ejeção: processo de abertura do molde para ejeção da peça pronta e fechamento para início de um novo ciclo (ROSATO; ROSATO; ROSATO, 2002).

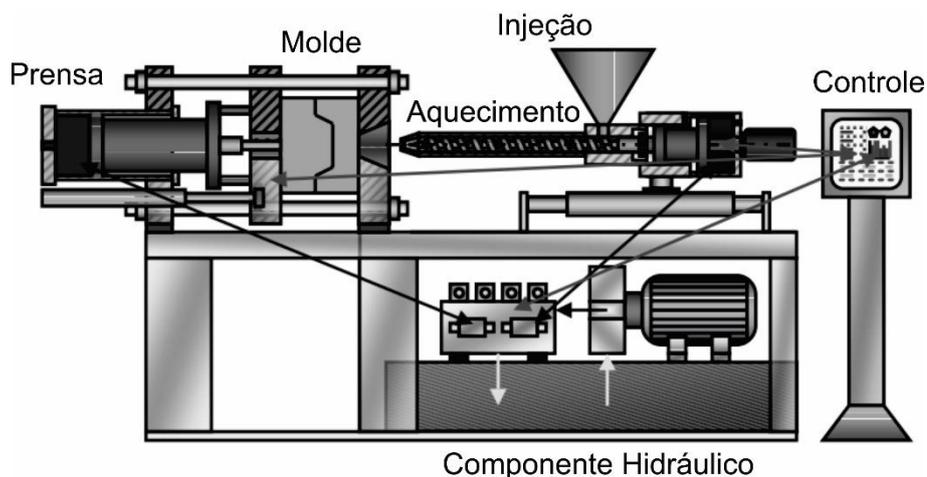


Figura 1 - Esquema de uma máquina de injeção por moldagem  
Fonte: Adaptado de Johannaber, 1994.

### 2.1.3 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA) é definida pela ISO/ASTM 52900:2015 como o processo de agregar materiais, normalmente camada por camada, de forma a construir um objeto a partir de dados de um modelo computacional em 3D. Existem diversas tecnologias diferentes de MA, cada qual com sua particularidade quanto ao funcionamento do equipamento. Apesar da tecnologia de manufatura aditiva não ser recente, com os primeiros equipamentos sendo comercializados a partir de 1987 (WOHLERS, 2014), somente nos últimos anos, com a redução dos custos dos equipamentos, é que a tecnologia se tornou popular, com crescimento da

indústria no ano de 2015 da ordem de 26% (WOHLERS et al., 2016) e 17,5% em 2016, com suas receitas ultrapassando a barreira dos 6 bilhões de dólares (WOHLERS et al., 2017).

### Classificação e equipamentos

Segundo a norma ISO/ASTM 52900:2015, que trata da terminologia acerca das tecnologias de manufatura aditiva, os processos de MA podem ser classificados em 7 categorias distintas: *Vat Photopolymerisation*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Material Extrusion*, *Powder Bed Fusion*, *Directed Energy Deposition* e *Sheet Lamination*.

A Figura 2 apresenta o processo de *Vat Photopolymerisation*, processo no qual um fotopolímero contido dentro de uma cuba torna-se rígido a partir da aplicação de luz UV, tecnologia na qual se encaixa o processo de estereolitografia (SLA), que é o processo mais popular que utiliza essa tecnologia (GIBSON et al., 2010). Tem como vantagens a precisão e o bom acabamento das peças impressas, porém é um processo relativamente caro (CHUA; LEONG, 2014).

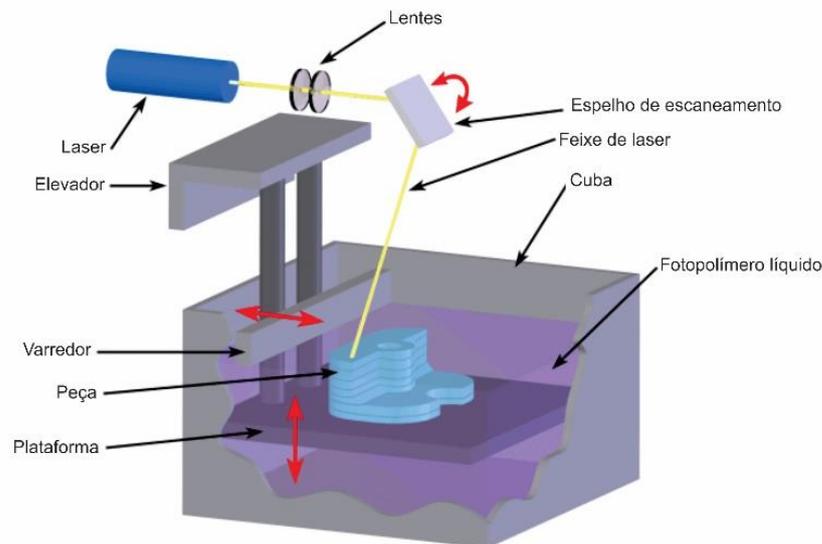


Figura 2 - Esquema do processo *Vat Photopolymerisation* do tipo SLA  
Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

A tecnologia *Material Jetting* (Figura 3), consiste na deposição de gotículas de material líquido, semelhante a uma impressora jato de tinta comum, porém para formar estruturas em 3 dimensões e, para isso, raios UV são utilizados para solidificar o material (GIBSON et al., 2010). Pode ser utilizada com diversos tipos de polímeros e tem elevado grau de precisão, contudo normalmente necessita da utilização de material para suporte (CHUA; LEONG, 2014).

A Figura 4 apresenta o processo *Binder Jetting*. Sendo que para esta aplicação são utilizados dois materiais, pó base e resina adesiva, onde a resina é depositada através de uma cabeça de impressão e, dessa forma, cola as partículas sólidas, formando o objeto em 3D (GIBSON et al., 2010). Pode ser usado para metais, polímeros e cerâmica, sendo essa diversidade de matérias primas suportadas uma de suas características mais positivas (CHUA; LEONG, 2014).

*Material Extrusion* é um dos processos mais populares de MA e consiste na deposição de matéria prima fusionada (GIBSON et al., 2010). Um dos processos mais conhecidos que utiliza essa tecnologia é o *Fused Deposition Modelling* (FDM), que representa grande parte das máquinas de prototipagem rápida em operação, sendo que quase metade dos novos equipamentos introduzidos no mercado de impressoras 3D utilizam essa tecnologia (ANITHA; ARUNACHALAM; RADHAKRISHNAN, 2001).

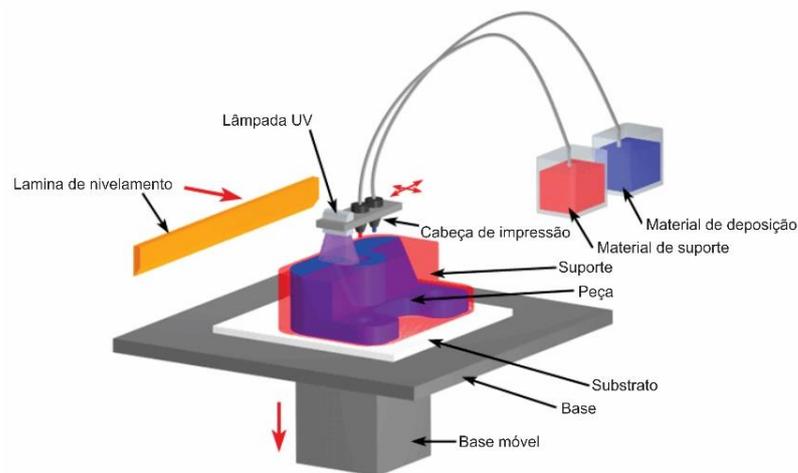


Figura 3 - Esquema do processo *Material Jetting*  
 Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

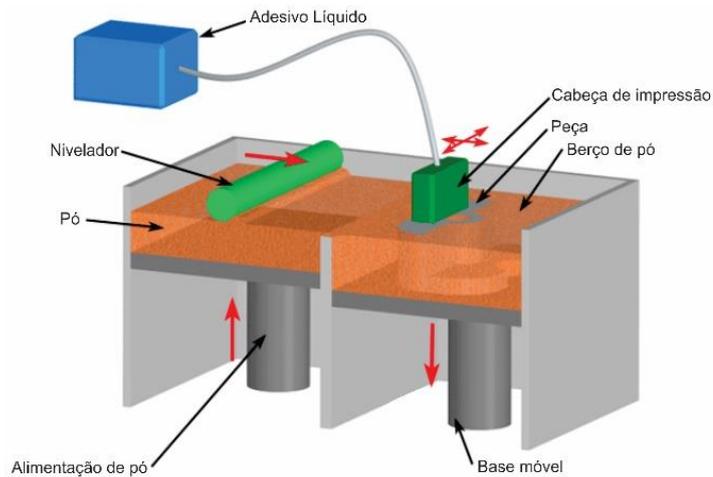


Figura 4 - Esquema do processo *Binder Jetting*  
Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

Tem como principal vantagem o baixo custo, porém possui baixa precisão e é um processo lento. A Figura 5 apresenta o esquema de funcionamento de um equipamento do tipo FDM que, neste caso, utiliza dois materiais, o de deposição da peça final e de suporte (CHUA; LEONG, 2014).

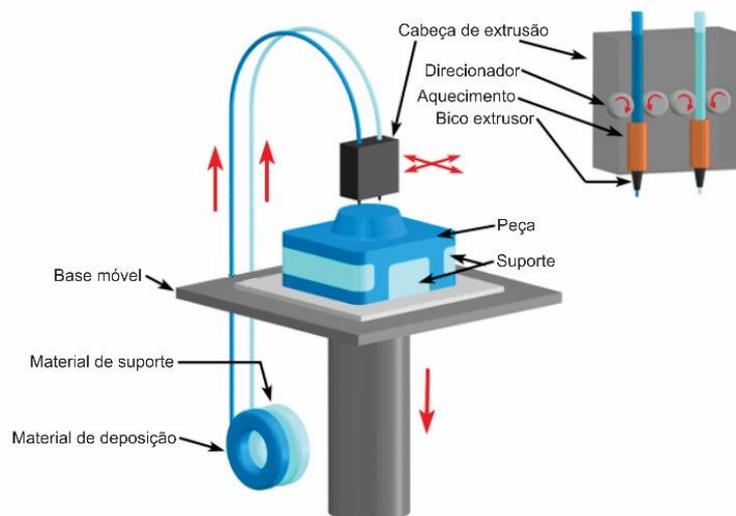


Figura 5 - Esquema do processo *Fused Deposition Modelling* (FDM)  
Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

O processo *Powder Bed Fusion* se caracteriza pelo uso de energia térmica que, ao ser aplicado em um berço de pó, funde-o para formar a estrutura tridimensional. O processo mais

conhecido que utiliza esta tecnologia é o *Selective Laser Sintering* (SLS) (Figura 6), que utiliza um feixe de laser de alta potência para fundir pequenas partículas de plástico, metal, cerâmica ou vidro e possibilita a formação de uma estrutura em 3D (GIBSON et al., 2010). Possui como principal desvantagem o alto consumo de energia, a baixa velocidade de impressão e as limitações quanto ao tamanho das peças impressas. (CHUA; LEONG, 2014).

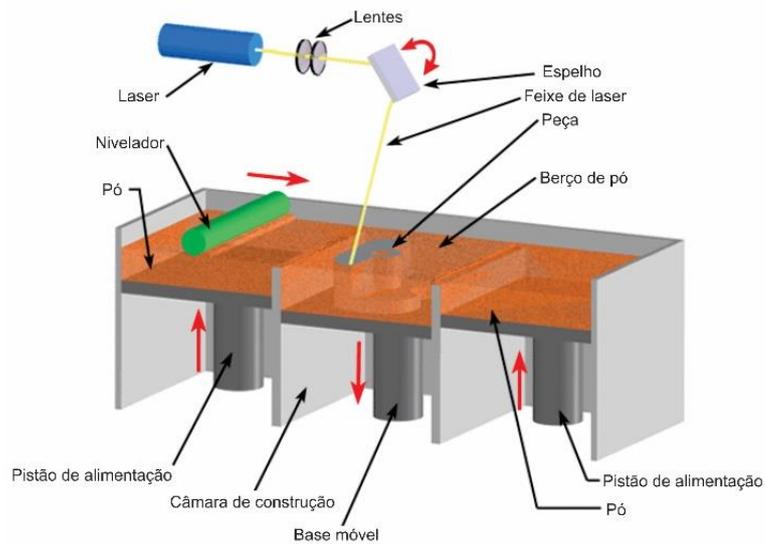


Figura 6 - Esquema do processo *Selective Laser Sintering* (SLS)  
Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

*Directed Energy Deposition*, tecnologia que consiste em depositar metal fundido (que pode ser pó ou fio), utilizando para fusão feixes de laser ou elétrons, formando a peça a medida em que o material é depositado (Figura 7) (GIBSON et al., 2010). Possui habilidade de controlar a estrutura granular, o que garante alta qualidade para peças funcionais, porém possui como desvantagem a limitação no tipo de material empregado (CHUA; LEONG, 2014).

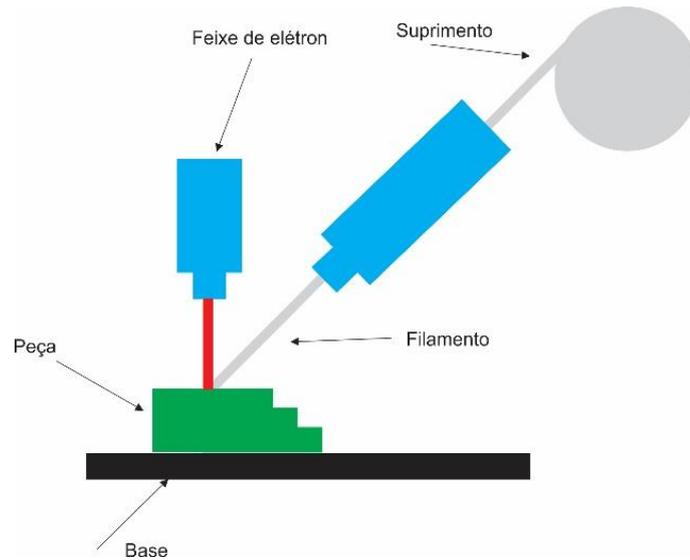


Figura 7 - Esquema do processo *Directed Energy Deposition*  
 Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

A Figura 8 mostra o esquema do processo conhecido como *Sheet Lamination*, que consiste na sobreposição de lâminas de metal, papel ou polímero, que são unidas através da aplicação de pressão externa e utilização de, no caso do metal, solda ultrassônica, sendo normalmente necessário um processo de usinagem para melhor conformação do material (GIBSON et al., 2010). Tem como vantagem o baixo custo e a velocidade, porém a qualidade do material está diretamente ligada ao método adesivo utilizado (CHUA; LEONG, 2014).

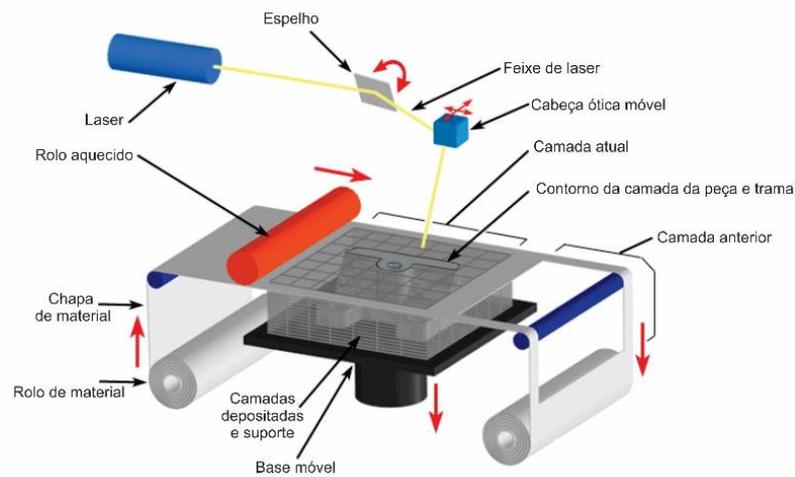


Figura 8 - Esquema do processo *Sheet Lamination*  
 Fonte: Adaptado de CustomPartNet (2008)

## 2.2 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O Acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é um termoplástico composto por uma mistura do copolímero acrilonitrila de estireno (SAN) e Polibutadieno (PB) (BEIGBEDER et al., 2013) e assim como o Policarbonato (PC), Polietileno Tereftalato (PET) são considerados plásticos de engenharia devido a sua resistência mecânica, rigidez, estabilidade química, resistência ao calor e baixo índice de propagação de chamas, sendo utilizado em diversas aplicações em equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) (TARANTILI; MITSAKAKI; PETOUSSI, 2010). Segundo Martinho et al., (2012) o ABS está presente em diversos tipos de EEE, desde pequenos equipamentos, até impressoras, monitores e televisores, podendo responder por até 69% em peso destes equipamentos.

O ABS também é muito utilizado pela indústria automotiva e de telecomunicações, principalmente devido ao fato de suas propriedades mecânicas e valor serem intermediários entre um termoplástico de baixo custo e de plásticos de engenharia de alta performance, e por todas essas razões sua reciclagem torna-se interessante (BOLDIZAR; MÖLLER, 2003).

Na maioria dos casos, no final da vida útil de um equipamento elétrico ou eletrônico, apesar de sofrer degradação quando reciclado, os plásticos de engenharia ainda preservam grande parte de suas propriedades, e podem ser utilizados como matéria prima na fabricação de novos componentes (TARANTILI; MITSAKAKI; PETOUSSI, 2010; LIU; BERTILSSON, 1999).

## 2.3 Avaliação de ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é definida pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, EUA e Europa) como uma metodologia objetiva para a avaliação dos impactos ambientais associados ao uso de um produto, processo ou atividade dentro de limites definidos. A ACV consiste na coleta, organização e avaliação de todas as entradas e saídas de um sistema de produto, analisando o potencial impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. (ABNT, 2009a; COLTRO, 2007). A definição de ciclo de vida refere-se a todas as atividades durante a vida de um produto, desde a extração, passando pelos processos de produção, processamento de matéria prima, manufatura, transporte, uso, reutilização, manutenção, reciclagem e disposição (SAIC, 2006). A Figura 9 apresenta os possíveis estágios que podem ser considerados como ciclo de vida de um produto durante a realização de uma ACV.

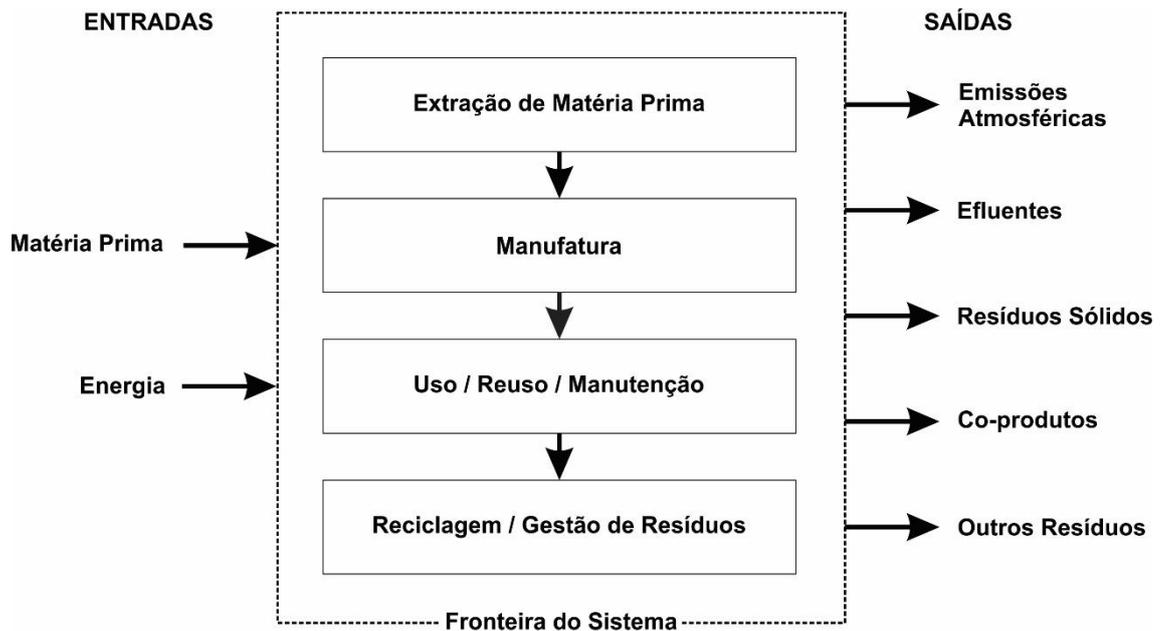


Figura 9 - Estágio do Ciclo de Vida

Fonte: Adaptado de Environmental Protection Agency (EPA) (1993)

Apesar do início dos estudos sobre ACV datar de 30 anos antes, somente na década de 90 observou-se um crescimento acentuado das publicações científicas sobre o tema, tais como Guinée, Udo de Haes e Huppés, 1993 e Guinée et al., 1993, além da criação do Comitê Técnico TC207/SC 5 pela *International Organization for Standardization* (ISO), de onde surgiram as primeiras normas ISO referentes a ACV (FINNVEDEN et al., 2009).

No início dos anos 2000 a *United Nations Environment Programme* (UNEP) e a SETAC lançaram uma iniciativa composta por 3 programas que foi batizada de *Life Cycle Initiative*. O programa *Life Cycle Management* (LCM) teve como objetivo produzir material com informações sobre ACV, além de estabelecer fóruns e programas de treinamento em todo o mundo. *Life Cycle Inventory* (LCI) foi o programa responsável por melhorar o acesso a dados do ciclo de vida de alta qualidade para os pesquisadores. Por fim o programa *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) visou aumentar a qualidade dos indicadores de ciclo de vida, promovendo a interação entre os envolvidos com ACV (SAIC, 2006).

As normas ISO criadas pelo Comitê Técnico TC207/SC 5 contaram com a ajuda de centenas de especialistas de diversos países sobre ACV (Sonnemann, 2004; Coltro, 2007), sendo elas:

- ISO 14040 – *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (1997);

- ISO 14041 – *Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis* (1998);
- ISO 14042 – *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment* (2000);
- ISO 14043 – *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation* (2000).

Essas normas foram válidas até o ano de 2005, quando foram substituídas pelas versões atuais (Coltro, 2007):

- ISO 14040 – *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (2006);
- ISO 14044 – *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines* (2006).

No Brasil os estudos sobre ACV iniciam-se na década de 90 com a criação do Grupo de Apoio a Normalização na ABNT que visava o desenvolvimento das normas ISO 14000 (SILVA; KULAY, 2006). Em 1998 é lançado o livro “Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000” (CHEHEBE, 1998), primeira publicação didática sobre a ACV.

A primeira normatização do país foi publicada em 2001 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da ISO 14040 (ABNT, 2009a). A internalização nas normas atuais ISO 14040 e ISO 14044 aconteceu no Brasil em 2009 e também foram feitas pela ABNT e deram origem as normas:

- NBR ISO 14040:2009 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura;
- NBR ISO 14044:2009 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

### **2.3.1 Aplicações da ACV e suas limitações**

Para SAIC (2006) a ACV pode ajudar os responsáveis pelas decisões a selecionarem produtos e processos produtivos com menor impacto ambiental. Os estudos sobre ACV ainda podem ser utilizados juntos a outros fatores além dos ambientais, tais como custo e performance, melhorando assim na decisão por um processo ou produto. Além disso, a ACV pode identificar a transferência de impacto ambiental entre processos, tais como a remoção de

gases tóxicos que seriam liberados na atmosfera que passam a gerar efluentes contaminados quando, por exemplo, esses gases são lavados por um lavador de gases.

Para Sonnemann (2004) e Gatti (2002) umas das principais aplicações da ACV é comparar alternativas para produtos e processos, avaliando, entre outros fatores, mudanças na utilização de matérias primas ou processos produtivos, de forma a minimizar os impactos causados por estes.

Sendo assim, podemos destacar que são dois os principais objetivos tratados em um estudo de ACV:

- Avaliação dos estágios de um ciclo de vida para identificar a transferência de impactos;
- Análise comparativa de diversos ciclos de vida "concorrentes", com diferentes características, a fim de identificar qual deles é menos impactante ao meio ambiente (Rosseaux, 2005).

Segundo Coltro (2007) a ACV é importante pois trata de forma clara e objetiva as questões ambientais complexas, subsidiando os responsáveis pelas decisões em questões como:

- Gerenciamento de recursos naturais;
- Identificação de *hotspots* em processos e produtos;
- Otimização de sistemas produtivos;
- Desenvolvimento de novos processos e produtos;
- Otimização de sistemas de reciclagem e recuperação energética.

Segundo a norma ABNT (2009a) os estudos de ACV podem dar subsídios para:

- Identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental;
- Selecionar indicadores de performance ambiental relevantes;
- Auxiliar no *marketing* verde por meio da rotulagem ambiental.

Além disso, SAIC (2006) afirma que por meio de estudo de ACV é possível:

- Desenvolver um sistema de avaliação sistemático dos impactos ao meio ambiente associadas a um produto;
- Analisar os *trade-offs* ambientais comparando processos e produtos;
- Quantificar as emissões para o ar, água e solo durante o ciclo de vida de um processo ou produto;

- Avaliar os impactos a saúde humana e ao meio ambiente comparativamente entre dois ou mais processos ou produtos;
- Identificar impactos a um ou mais áreas específicas.

Entretanto, apesar das inúmeras aplicações da ACV, a metodologia possui limitações, que devem ser considerados no decorrer dos estudos bem como na avaliação de seus resultados. Segundo Silva e Kulay (2006) em meados da década de 80 a credibilidade dos estudos de ACV foi questionada devido as diferenças em resultados em estudos semelhantes e essas disparidades foram atribuídas a complexidade dos estudos de ACV, que fazia com que os critérios adotados para definição dos procedimentos de coleta de dados variassem, o que alterava de maneira significativa os resultados.

O alto custo e tempo despendido para a realização de uma ACV, principalmente durante a etapa de coleta de dados, são fatores limitantes para o desenvolvimento do estudo (SILVA; KULAY, 2006; SAIC, 2006). A dificuldade na obtenção dos dados e no desenvolvimento e consolidação de uma metodologia para realização dos estudos são obstáculos a serem transpostos durante a realização de uma ACV, pois a disponibilidade de dados tem impacto direto na condução do estudo (SAIC, 2006). Silva e Kulay (2006) destacam que em muitos casos os estudos são inviabilizados por desinteresse de empresas ou setores produtivos, seja por motivo de confidencialidade na tecnologia ou insumos utilizados nos processos, passando pelo receio de despertar atenção de agentes reguladores e de organizações não governamentais (ONG) (SAIC, 2006).

Visando minimizar essas limitações no que se refere a aquisição dos dados, uma das soluções propostas é a disponibilização de bancos de dados, sendo esses bancos constituídos de inventários de ciclo de vida comuns a diversos processos (SILVA;KULAY, 2006).

## **2.3.2 Metodologia da ACV**

### **2.3.2.1 Fases da ACV**

Um estudo de ACV é composto por quatro fases, como apresentado pela Figura 10. A primeira fase é a Definição do Objetivo e Escopo, seguido pela fase de Análise de Inventário, Avaliação de Impacto e Interpretação. Como é possível observar na Figura 10 um estudo de ACV não é necessariamente linear, havendo interação entre todas as etapas durante a realização

do estudo, sendo necessária interpretação dos dados obtidos durante todas as fases, para que alterações ou melhorias possam ser implementadas ao longo do ACV.

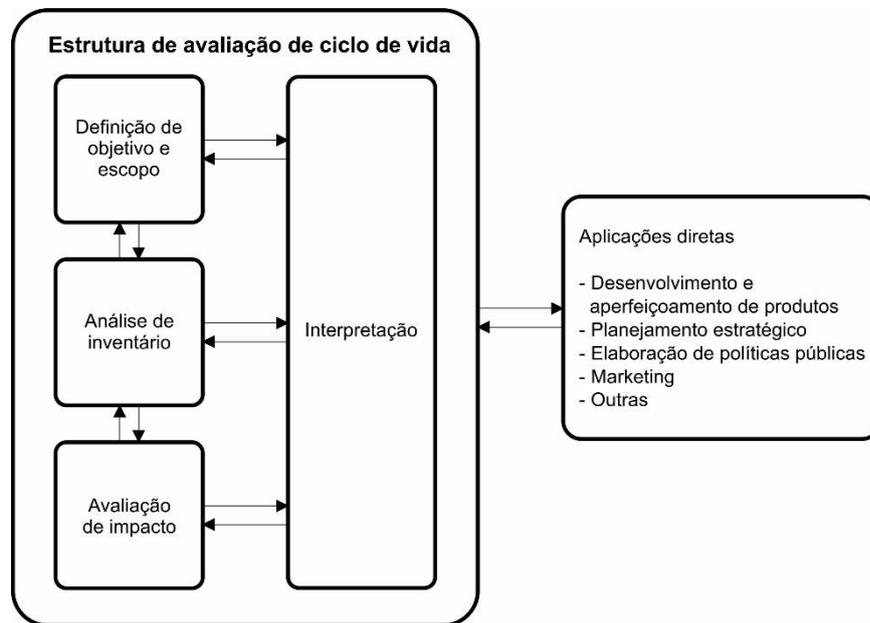


Figura 10 - Estrutura de avaliação de ciclo de vida

Fonte: ABNT (2009b)

### 2.3.2.2 Definição de objetivo e escopo

Um estudo de ACV tem início com a definição do objetivo e escopo. Nessa etapa deve ser definida a razão principal para a realização do estudo, bem como sua abrangência e limites. Segundo a norma ABNT (2009b) para a definição do objetivo de uma ACV deve-se ter claros:

- A aplicação do estudo;
- A motivação para a realização do estudo;
- O público-alvo dos resultados obtidos;
- A intenção de divulgar os resultados publicamente.

Chehebe (1998) ressalta o caráter preliminar das definições dos objetivos da ACV, visto que a metodologia é iterativa, e a revisão do planejamento inicial pode ser feita, se necessário.

Definido o objetivo do estudo, a próxima etapa é a definição do escopo. Segundo a ABNT (2009b) para se definir o escopo de um estudo de ACV devem ser considerados e descritos os itens:

- O sistema de produto a ser estudado;
- A função do sistema de produto;

- A unidade funcional;
- A fronteira do sistema;
- Procedimentos de alocação;
- Metodologia de AICV e tipos de impactos;
- Interpretação a ser utilizada;
- Requisitos de dados;
- Pressupostos;
- Limitações;
- Requisitos de qualidade dos dados;
- Tipo de revisão crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório.

Para Chehebe (1998) o escopo de um estudo de ACV refere-se as suas 3 dimensões: a extensão (onde inicia-se e termina o estudo), a largura (quantos e quais subsistemas serão incluídos) e a profundidade (qual o nível de detalhamento do estudo).

As normas ABNT (2009a b) detalham com maior clareza todos os pontos que devem ser considerados para a definição do escopo do estudo e estes são apresentadas a seguir.

#### *O sistema de produto a ser estudado*

O sistema de produto é o conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e também de produtos, que desempenham uma ou mais funções e que modela o ciclo de vida do produto (Figura 11) (ABNT 2009b). Os processos elementares, como demonstrado por meio da Figura 12, são interligados por fluxos de produtos intermediários e/ou resíduos para tratamento, a outros sistemas de produto por fluxos de produtos e ao meio ambiente por fluxos elementares (ABNT, 2009a). Os fluxos elementares incluem o uso de recursos e as emissões atmosféricas, emissões ao solo e água associados ao sistema. Como exemplo de fluxos elementares entrando no processo elementar podemos citar petróleo bruto extraído do solo e saindo do processo elementar os gases do escapamento de um carro (ABNT, 2009a). Os fluxos intermediários podem ser materiais básicos e subcomponentes, que saem de um processo elementar e entram em outro processo elementar dentro do próprio sistema de produto. A divisão de um sistema de produtos em processos elementares visa facilitar a correta identificação das entradas e saídas do sistema de produtos, pois em alguns casos as entradas podem ser utilizadas como

componentes do produto saída, enquanto outras podem ser utilizadas dentro de um processo elementar (ABNT, 2009a).

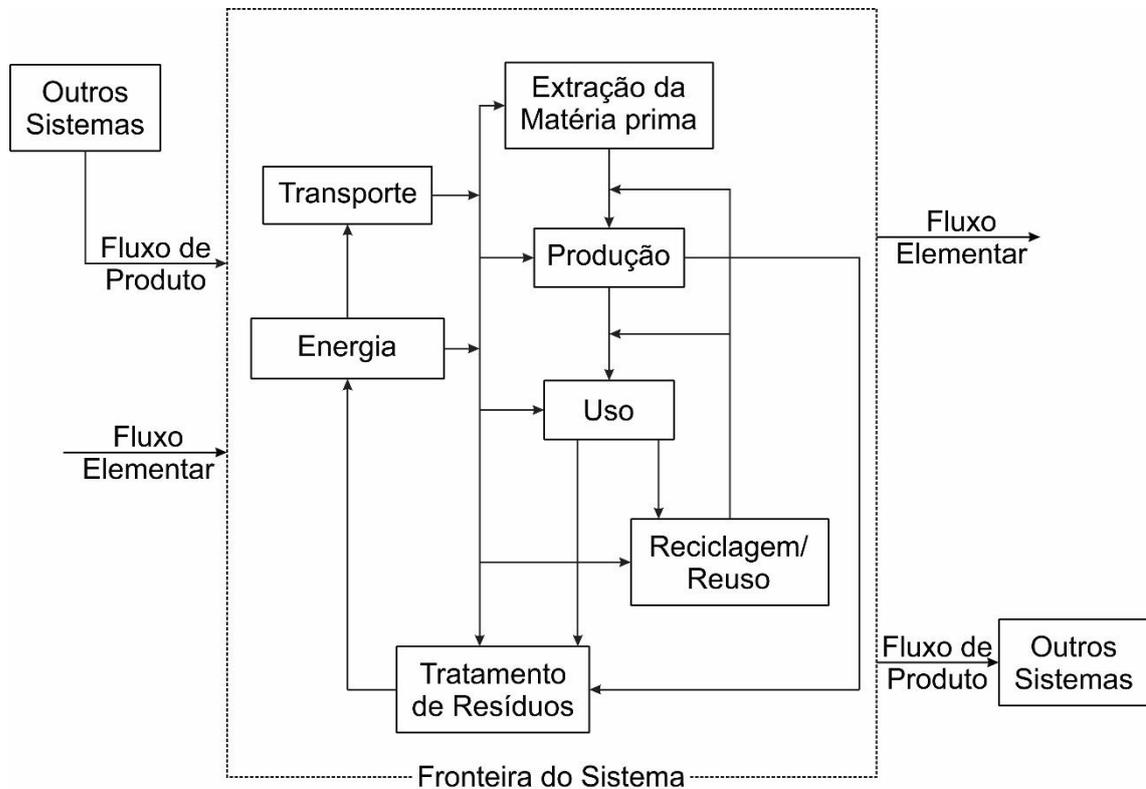


Figura 11 - Exemplo de sistema de produto  
Fonte: ABNT (2009a)

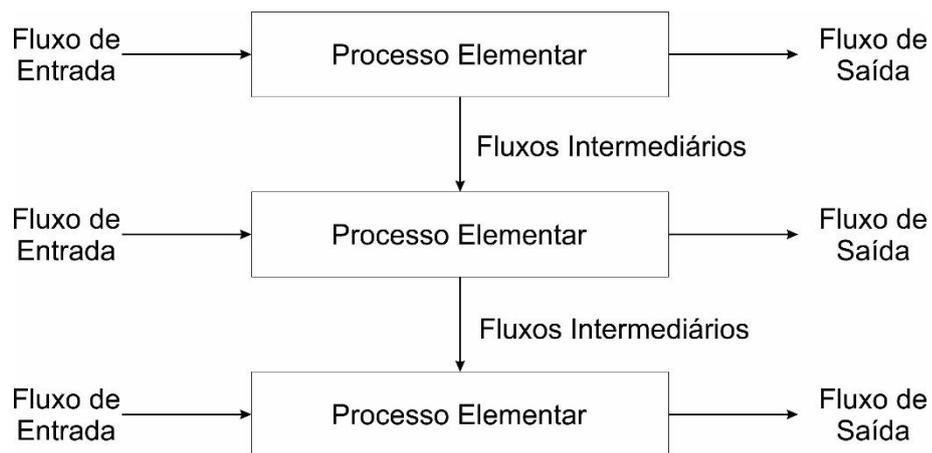


Figura 12 - Exemplo de um conjunto de processos elementares  
Fonte: ABNT (2009a)

Segundo EC/JRC/IES (2010) um sistema de produto pode ser:

- Cradle-to-grave (do berço ao túmulo): Um estudo completo, considerando todos os processos elementares do ciclo de vida do produto;
- Cradle-to-gate (do berço ao portão da fábrica): Considera os processos elementares desde extração das matérias primas até a manufatura dos produtos;
- Gate-to-gate (do portão ao portão da fábrica): Considera somente as etapas de manufatura dos produtos;
- Gate-to-grave (do portão da fábrica ao túmulo): Considera os processos elementares das etapas de distribuição e fim de vida dos produtos.

#### *A função do sistema de produto*

Para Chehebe (1998) a definição da função dentro da etapa de definição objetivo e escopo é uma das mais importantes considerações a se fazer, podendo ter uma única função ou várias possíveis funções, dependendo do objetivo e escopo do estudo. Um exemplo da determinação de função de um estudo de ACV citado por ABNT (2009a) é quando deseja-se realizar uma ACV comparando o uso de toalhas de papel e de secadores a ar em banheiros. Nesse caso, apesar de serem dois processos diferentes em sua essência de funcionamento, a função a ser definida é a mesma, secar as mãos.

#### *A unidade funcional*

A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas, e tem por função fornecer referências a relação entre as entradas e saídas (ABNT, 2009a). A correta definição da função e da unidade funcional possibilita a comparação entre processos de tecnologias diferentes, assegurando que a comparação seja feita em uma base comum (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Continuando no exemplo de secagem de mãos, a unidade funcional deste problema pode ser definida em termos de números iguais de secagem de mãos para os dois sistemas. Além da unidade funcional, outro importante item é determinar o fluxo de referência, que é a quantidade de produtos necessária para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009a). Ainda no exemplo de secagem de mãos, o fluxo de referência para o processo com toalhas de papel pode ser a massa média de papel ou o volume médio de ar quente necessários para secar o número de mãos descritos na unidade funcional.

#### *A fronteira do sistema*

Segundo a ABNT (2009b) a fronteira define quais processos elementares serão incluídos no sistema, sendo que os critérios utilizados para a determinação da fronteira do sistema devem ser claramente explicados. A definição da fronteira do sistema deve estar de acordo com o objetivo e escopo do estudo, além de atender a aplicação pretendida para o estudo, bem como seu público alvo (ABNT, 2009a).

Para Coltro (2007) a fronteira do sistema deve ser definida em diversas dimensões:

- Em relação aos sistemas naturais: definição do limite entre o sistema técnico e o meio ambiente (início e fim do sistema);
- Geográfica: delimitação da área do sistema estudado;
- Temporais: determinação do tempo do estudo;
- Em relação ao sistema técnico relacionados com a produção: definição das atividades que constam no ciclo de vida do produto que serão incluídas ou excluídas no estudo.

Ainda segundo Coltro (2007) deve-se descrever o sistema técnico com um fluxograma que contenha todos os processos elementares incluídos no estudo de ACV. Um exemplo de fronteira para um sistema de produto pode ser visto por meio da Figura 13.

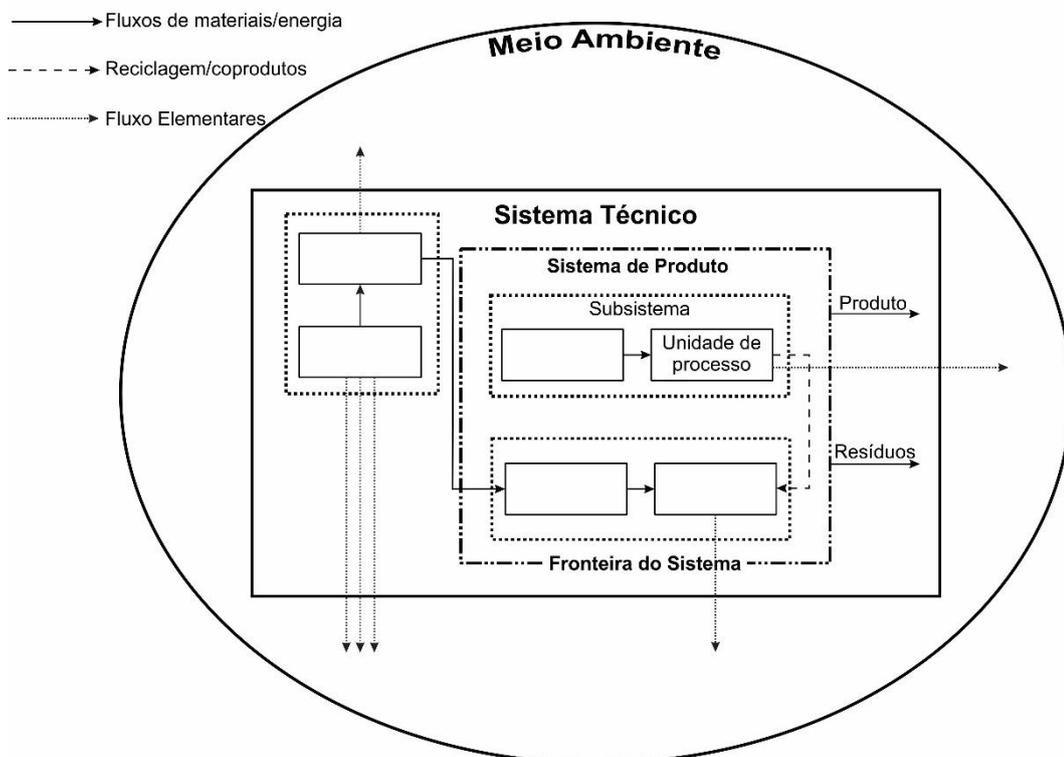


Figura 13 - Exemplo de fronteira de um sistema de produto  
Fonte: SILVA (2012)

### *Procedimentos de alocação*

Segundo ABNT (2009a) poucos processos na indústria existem de forma isolada, não importando a largura ou a extensão dos seus limites, contendo assim de maneira geral múltiplos produtos. Exemplos disso podem ser descritos como a produção de leite e queijo, suco de laranja e ração para gado, óleo diesel e gasolina e etc. (COLTRO, 2007). Os chamados coprodutos podem ser utilizados em etapas seguintes e para essa etapa ser o produto principal, sendo assim, definir qual o produto principal do estudo de ACV desenvolvido depende do objetivo do estudo.

Não é certo fazer do produto principal o único responsável por todos os impactos ambientais gerados por um processo, devendo este ser repartido entre os outros produtos, coprodutos ou subprodutos gerados (CHEHEBE, 1998). Dessa maneira o procedimento de alocação realiza a distribuição proporcional dos fluxos de entrada e saída, e os métodos para se realizar essa alocação pode ser baseado em propriedades físicas (massa ou energia) ou critérios econômicos (baseados no valor econômico dos produtos) (COLTRO, 2007).

### *Metodologia de AICV e tipos de impactos*

Nessa etapa devem ser determinadas quais categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização serão incluídos no estudo de ACV, de acordo com o objetivo do estudo (ABNT, 2009b).

### *Requisitos de dados*

Segundo Chehebe (1998) os requisitos de qualidade dos dados devem permitir que o estudo de ACV, definido no objetivo e escopo do estudo, possa ser realizado de maneira satisfatória. Esses requisitos devem contemplar:

- Cobertura relacionada ao tempo: a idade almejada dos dados e o período mínimo de tempo para coleta de dados;
- Cobertura geográfica: área geográfica da unidade de processo onde serão coletados os dados (deve estar de acordo com o objetivo e escopo);
- Cobertura tecnológica: tecnologia específica ou conjunto de tecnologias abordados no estudo;
- Precisão: medida da variabilidade dos dados para cada dado expresso;
- Integridade: percentual de dados primários em relação aos dados potenciais existentes para cada categoria de dados;

- Representatividade: avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete a população de interesse;
- Consistência: avaliação qualitativa quanto a uniformidade da metodologia de estudo aos diversos componentes da análise;
- Reprodutibilidade: avaliação qualitativa do grau em que as informações sobre a metodologia e dados permitiriam a reprodução dos resultados obtidos.

### **2.3.2.3 Análise de inventário de ciclo de vida (ICV)**

Segundo a ABNT (2009a) a análise de inventário de ciclo de vida (ICV) é um processo iterativo que consiste na coleta de dados e procedimentos de cálculo visando quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto. Conforme os dados são coletados aumenta-se o conhecimento sobre o sistema estudado e, conseqüentemente, novos requisitos ou limitações podem ser identificados, o que pode implicar em mudanças no objetivo e escopo do estudo. O ICV pode ser visto como um balanço contábil-financeiro, só que medido em termos de energia e massa, onde o total do que entra no sistema de estudo deve ser igual ao que sai (CHEHEBE, 1998). Segundo a ABNT (2009b) durante a execução do plano para a ICV devem ser seguidos passos operacionais como os descritos na Figura 14.

ABNT (2009a) destaca algumas das etapas executadas durante a análise ICV:

- Coleta de dados: devem ser coletados os dados de cada processo dentro da fronteira do sistema (entradas de energia e matéria primas, produtos, coprodutos, resíduos, emissões, efluentes e etc.)
- Cálculo com os dados: deve-se realizar os cálculos após a aquisição dos dados de maneira a validar os dados coletados, realizar a correlação dos dados aos processos elementares e também aos fluxos de referência e unidade funcional.
- Alocação de fluxos: a maioria dos processos industriais contempla mais de um produto e estes tornam-se matéria prima de produtos intermediários. Nesses casos deve ser considerada a necessidade de procedimentos de alocação.

A etapa de inventário é, na prática, a etapa mais trabalhosa e difícil em um estudo de ACV, sendo a etapa que demanda maior tempo e recursos (CHEHEBE, 1998; SILVA;KULAY,2006).

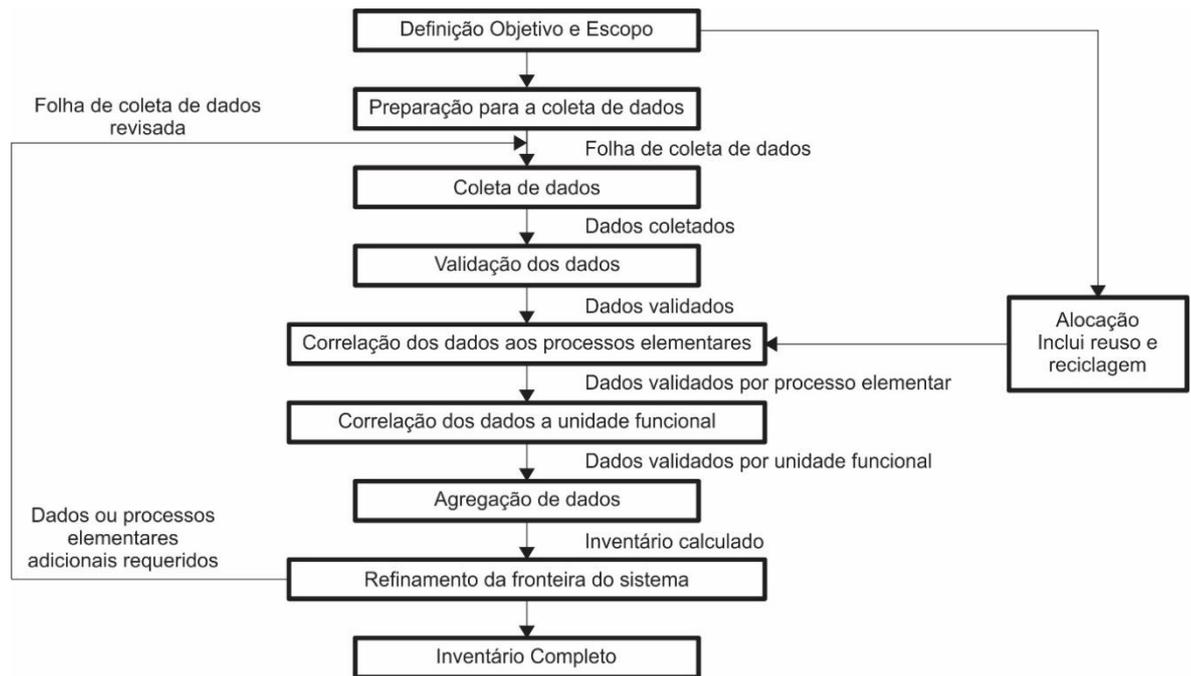


Figura 14 - Procedimentos para análise de inventário  
Fonte: ABNT (2009b)

#### 2.3.2.4 Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV)

A avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), como mostra a Figura 14, se propõe a estudar a relevância dos impactos ambientais potenciais, utilizando-se para isso dos resultados obtidos no ICV, associando os dados obtidos no inventário com categorias de impacto específicas e, dessa maneira, melhor representar os impactos gerados por um processo (ABNT, 2009a). Segundo ABNT (2009b) a AICV deve conter obrigatoriamente:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: Devem ser identificados os maiores focos de preocupação ambiental, as categorias e os indicadores que serão utilizados no estudo (CHEHEBE, 1998);
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação): os dados do inventário devem ser classificados nas diversas categorias (relacionadas a efeitos ou impactos ambientais conhecidos, tais como aquecimento global, acidificação, saúde humana e etc.) (CHEHEBE, 1998);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização): consiste na modelagem dos dados de inventário na forma de indicadores numéricos para a categoria de impacto.

Além dos elementos obrigatórios a ABNT (2009b) cita os elementos opcionais que podem ser utilizados dependendo do objetivo e escopo do ACV, sendo eles:

- Normalização: execução de cálculos da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria em relação a informação de referência;
- Agrupamento: consiste no agrupamento e possível hierarquização das categorias de impacto;
- Ponderação: atribuição de pesos de acordo com a relevância de determinada categoria;

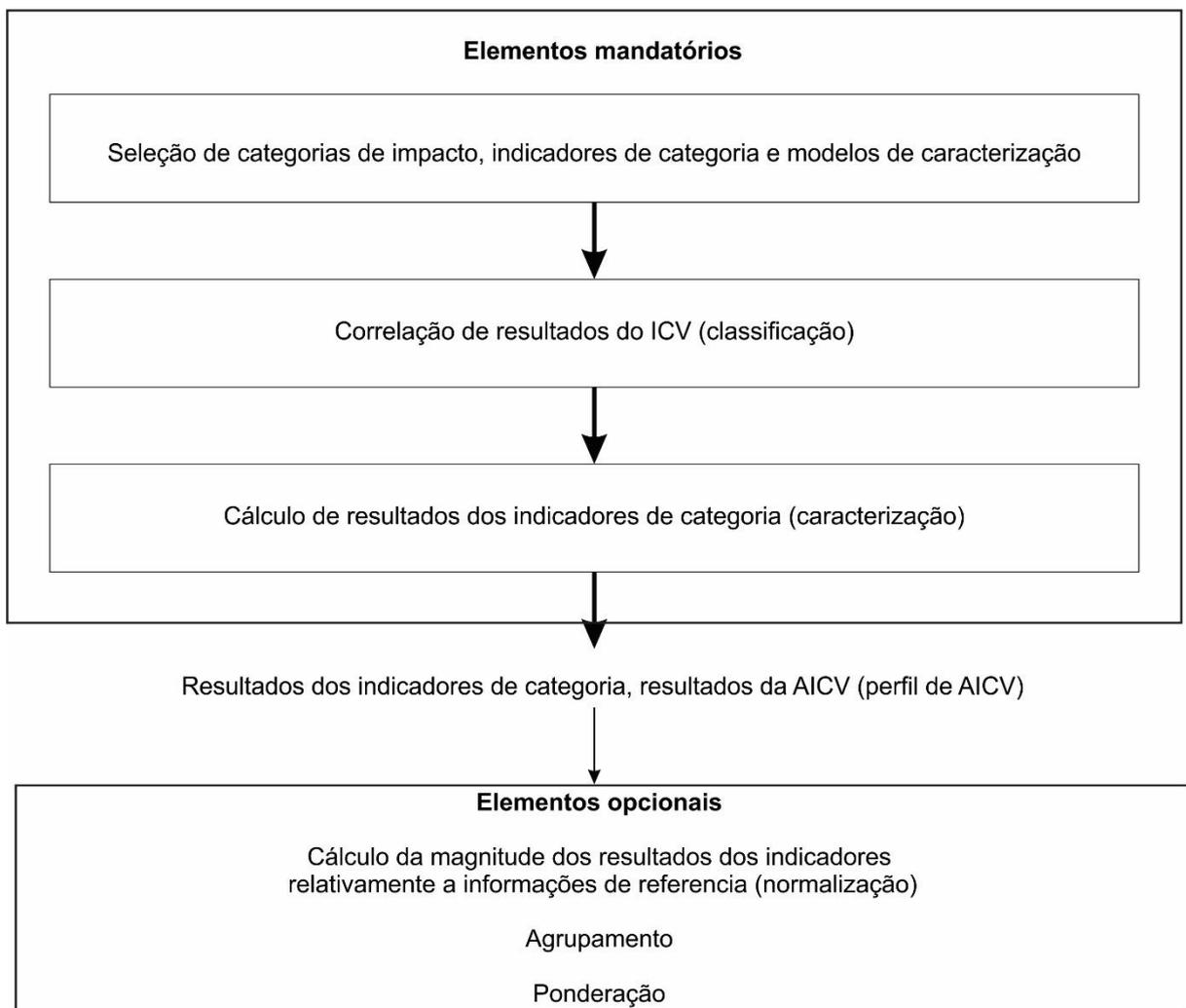


Figura 15 - Elementos da fase de AICV  
Fonte: ABNT (2009b)

### 2.3.2.5 Interpretação

Segundo Chehebe (1998) ao final do estudo de ACV há a necessidade de uma avaliação dos resultados obtidos e dos critérios adotados durante a realização do estudo, garantindo assim que os objetivos delineados durante a fase de objetivo e escopo tenham sido atingidos de

maneira satisfatória. A interpretação do ciclo de vida envolve o processo iterativo de rever e revisar o escopo da ACV, bem como a natureza e qualidade dos dados coletados, além de garantir uma apresentação compreensível, completa e consistente, de forma a fornecer conclusões e recomendação aos tomadores de decisão (ABNT, 2009a).

A etapa de interpretação de um estudo de ACV deve incluir diversos elementos tais como (ABNT, 2009b):

- Identificação dos *hotspots* com base nas fases de ICV e AICV da ACV: objetiva estruturar os resultados, ajudando a determinar as questões de maior relevância (*hotspots*) em consonância com o objetivo e escopo propostos. Exemplo de *hotspots*: nos dados de inventário, tais como energia, emissões, efluentes; nas categorias de impacto, como uso de recursos, mudança climática; contribuições significativas de processos elementares individuais, tais como produção de energia ou transporte.
- Avaliação do estudo, considerando verificações de sensibilidade e consistência: visa avaliar a confiabilidade dos resultados e conclusões, assegurando que todas as informações relevantes e os dados necessários para a interpretação estejam disponíveis e completos, além de verificar se os pressupostos, métodos e dados estão de acordo com o objetivo e escopo do estudo.
- Conclusões, limitações e recomendações: o objetivo central da etapa de interpretação são as conclusões, identificando os *hotspots*, de forma a auxiliar os tomadores de decisão. Além disso, é importante que haja clareza nas limitações do estudo e coerência nas recomendações realizadas a partir dos resultados obtidos.

### 2.3.3 Bancos de dados e *softwares* de ACV

Para Chehebe (1998) a etapa fundamental para os estudos de ACV é a de Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), pois é nesta fase em que são quantificados todos os aspectos ambientais do ciclo de vida de um produto. Dessa maneira, para facilitar a elaboração dos estudos foram criados bancos de dados regionalizados, que concentram inventário de ciclo de vida de diversos processos para que estes possam ser usados em diferentes estudos, facilitando o estudo para quem os está conduzindo.

Existem hoje diversos bancos de dados elaborados em diversos países, que podem ser gratuitos, com livre acesso a pesquisadores ou com acesso restrito, sendo necessário a compra do banco de dados ou aquisição em conjunto com um *software*. Os principais bancos de dados

existentes hoje são listados na Tabela 1, bem como o país de origem e o tipo de acesso (gratuito ou restrito) dos bancos de dados.

Tabela 1 - Principais bancos de dados para ACV

Nome do banco de dados	Região	Tipo de acesso
AusLCI – The Australian Life Cycle Inventory Database Initiative	Austrália	Gratuito
CLCD – Chinese Life Cycle Database	China	Restrito
CRMD – Canadian Raw Material Database	Canadá	Gratuito
ecoinvent	Suíça	Restrito
ELCD – European Reference Life Cycle Database	União Europeia	Gratuito
GaBi database	Alemanha	Restrito
IVAM LCA Data	Holanda	Restrito
Japan National LCA Project	Japão	Restrito
LCA Food	Dinamarca	Gratuito
SICV Brasil – Sistema de Inventário do Ciclo de Vida do Brasil	Brasil	Gratuito
US LCI Database Project	Estado Unidos	Gratuito

Fonte: Adaptado de Curran (2006) e Silva (2016)

Além das bases de dados que possibilitam grande suporte para a execução de estudos de ACV, outra importante ferramenta são os *softwares*, que visam facilitar a gestão operacional dos estudos, devido a sua complexidade e quantidade elevada de dados a serem gerenciados. Existem hoje disponíveis no mercado diversos *softwares* para realização de estudo de ACV, de maneira análoga aos bancos de dados, muitos deles possuem acesso gratuito, enquanto algumas empresas comercializam licenças para estes *softwares*, tornando-os restritos para utilização. A Tabela 2 apresenta os principais *softwares* disponíveis no mercado listado por Curran (2006). Segundo Cherubini e Ribeiro (2015) e Silva et al. (2017) os *softwares* mais utilizados para estudos de ACV são: GaBi, OpenLCA, SimaPro e Umberto.

Tabela 2 – Principais *softwares* de ACV

Nome do <i>software</i>	Tipo de acesso
BEES	Gratuito
CMLCA	Restrito
eiolca.net	Gratuito
EMIS	Restrito
GaBi	Restrito
GREET	Gratuito
OpenLCA	Gratuito
Regis	Restrito
SimaPro	Restrito
TEAM	Restrito
Umberto	Restrito

Fonte: Adaptado de Curran (2006)

Além da utilização das bases de dados e dos *softwares* para realização de uma ACV outra importante escolha que pode determinar a qualidade e confiabilidade dos estudos é a correta seleção de métodos de avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida dos produtos (AICV).

#### 2.3.4 Métodos de avaliação de impactos

Os métodos de avaliação de impactos surgiram na década de 90 com o objetivo de auxiliar nos cálculos de impactos ambientais baseando-se no perfil do processo estudado (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015). Existem dois tipos de classificação para os métodos, os do tipo *midpoint* (ponto intermediário) e *endpoint* (ponto final).

Os métodos do tipo *midpoint* utilizam indicadores de categorias de impacto que estão situados entre as emissões e o impacto final, tais como acidificação, ecotoxicidade, aquecimento global e etc. Os métodos *endpoint* correlacionam os aspectos ambientais do ICV diretamente com danos finais, tais como prejuízos à saúde humana, ameaça de extinção de espécies e etc. (SILVA, 2016). A Tabela 3 relaciona os principais métodos de avaliação de impacto e o tipo de resultado obtido com a utilização do método (*midpoint/endpoint*).

Tabela 3 - Principais métodos AICV

<b>Nome do método</b>	<b><i>midpoint/endpoint</i></b>
CED	midpoint
CML-IA	midpoint
Ecological Scarcity 2013	endpoint
EDIP 2003	midpoint
ILCD 2011	midpoint
Impact 2002+	midpoint e endpoint
IPCC 2013	midpoint
ReCiPe	midpoint e endpoint
USETox	midpoint

Fonte: Adaptado de Silva (2006) e Cherubini e Ribeiro (2015)

### **2.3.5 Performance ambiental e ACV em manufatura aditiva**

Esta seção teve por objetivo avaliar os trabalhos publicados que avaliaram a performance ambiental dos processos de MA, em especial aqueles que realizaram ACV destes processos, seja de forma isolada ou comparativamente com outros tipos de manufatura.

A metodologia adotada baseou-se na revisão bibliométrica sistemática (RBS), que é definida por Kitchenham (2004) como um estudo que tem como objetivo interpretar e avaliar a literatura disponível relevante sobre um assunto, fenômeno ou área de interesse. Para desenvolver uma RBS foram necessários três passos básicos: planejamento, execução da revisão teórica e demonstração dos resultados (BRERETON et al., 2007). Uma visão detalhada da metodologia adotada pode ser vista na Figura 16.

Na primeira etapa da metodologia, a etapa de planejamento, consiste em definir o objetivo da RBS, ou seja, estabelecer a motivação para se realizar a revisão. Ainda nessa etapa é necessário definir qual será a base de dados utilizada na pesquisa, podendo ser a base de dados uma base generalista como a Web of Science (WoS), Scielo, Scopus, ou se serão pesquisados apenas periódicos específicos da área, baseado no fator de impacto da revista ou aderência dos artigos publicados no periódico escolhido ao tema da revisão. Além disso, nessa etapa são definidos os parâmetros de busca, tais como idioma e tipo de documento, e também o período que será pesquisado.

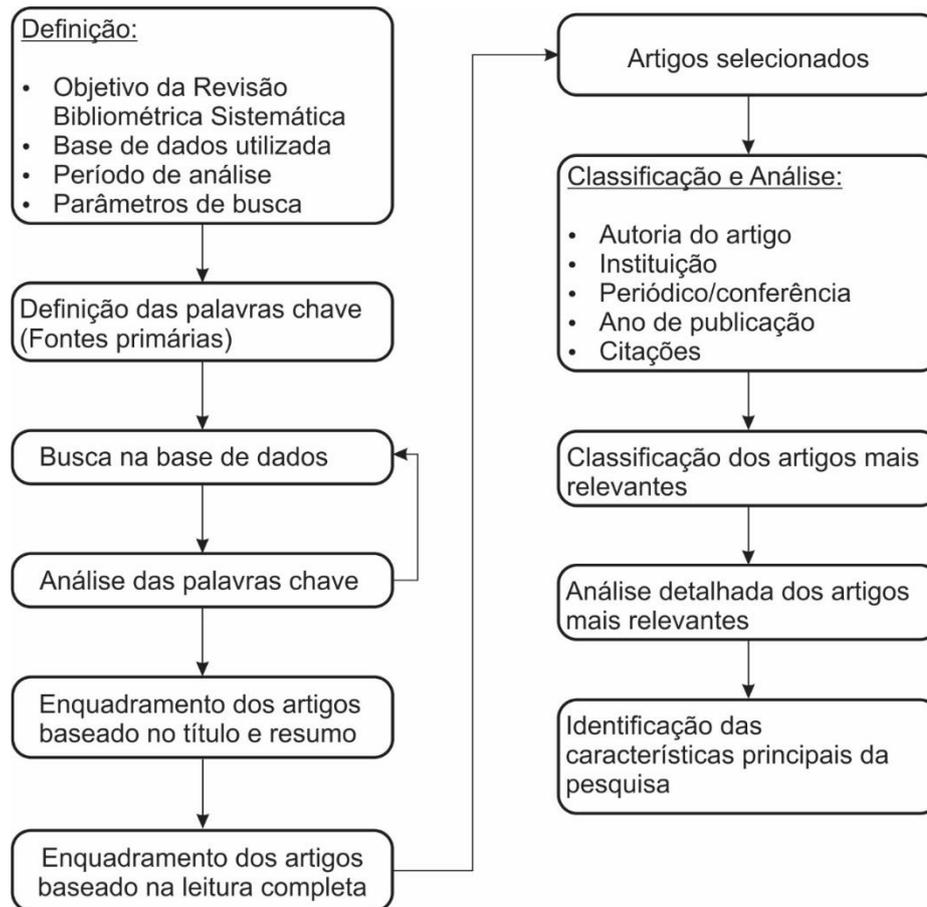


Figura 16 - Procedimentos detalhado da metodologia RBS  
Fonte: Adaptado de (BRERETON et al., 2007; KITCHENHAM, 2004)

Para esta revisão definiu-se a Web of Science (WoS) e a Scopus como bases de dados utilizadas para as pesquisas, abrangendo todas as publicações de artigos desde 1999 (ano da primeira publicação encontrada) até 2016. Além disso, definiu-se como critério de seleção os seguintes parâmetros: Idioma – Inglês, Tipos de documento – “*Article*” e “*Proceedings Paper*”. Ainda na etapa inicial de planejamento definiu-se o foco do trabalho: revisar a literatura que estudasse a manufatura aditiva com um viés ambiental, ou seja, com foco na gestão ambiental dos processos de MA.

Definidos os parâmetros iniciais, citados acima, foi possível iniciar a busca por palavras chave. A busca por palavras chave foi realizada a partir da leitura de artigos que possuam grande relevância na área e também consulta a especialistas e pesquisadores experientes acerca do assunto. Dessa forma as palavras chave encontradas relacionadas ao caráter ambiental foram “*Environmental impact*”, “*Environmental impacts*”, “*Sustainability*” and “*Sustainable*” e as palavras chave acerca da manufatura aditiva “*Additive manufacturing*”, “*3D printing*” e “*Rapid Prototyping*”.

Para a busca nas bases de dados escolhida foi necessário formular *strings* de busca. Essas poderiam ser simplesmente compostas por uma única palavra chave, quando o assunto pesquisado é representado por um único termo, ou utilizando mais de uma palavra na mesma *strings*, sendo para isso necessário a utilização dos operadores lógicos (*OR*, *AND*), que variam de acordo com a base de dados pesquisada, e tem por função unir as palavras chave. Para esse estudo necessitou-se criar *strings* que relacionassem a manufatura aditiva com o caráter ambiental proposto. Dessa forma, realizou-se a busca concatenando uma palavra chave relativa a manufatura aditiva, seguida pelo operador lógico “*AND*” e outra palavra chave referente a gestão ambiental. Utilizando as palavras chave “*Environmental impact*”, “*Environmental impacts*”, “*Sustainability*”, “*Sustainable*”, “*Additive manufacturing*”, “*3D printing*” e “*Rapid Prototyping*” conseguiu-se um total de 12 “*strings*” de busca, que foram inseridas nas bases de dados selecionando-se como campo de busca a opção “*topic*”, que é a opção que realiza a busca no título, resumo e palavras chave registrados, encontrou-se um total de 104 artigos.

Com base nos artigos encontrados foi possível fazer uma análise das principais palavras chave encontradas nesses artigos, que façam referência ao tema ao qual pretende-se estudar, e então inserir essas novas palavras chave na pesquisa. Para a extração das palavras chave, pode-se utilizar ferramentas computacionais, como é o caso do CiteSpace III, que possibilita a visualização das principais palavras chave de um conjunto de artigos. Com a análise dos 104 artigos encontrados por meio do software CiteSpace III versão 4.0.R5 SE (32-bit) verificou-se a necessidade da inserção de mais dois termos, “*Energy consumption*” e “*3-D printing*”. Com a adição de mais duas palavras chave chegou-se a um total de 20 *strings* de busca: (“*Environmental impact*”, “*Environmental impacts*”, “*Sustainability*”, “*Sustainable*” e “*Energy consumption*”) *AND* (“*Additive manufacturing*”, “*Rapid Prototyping*”, “*3D printing*” e “*3-D printing*”), o que resultou em 240 artigos encontrados nas bases de dados. Como esse processo é iterativo uma nova análise de palavras chave dos artigos encontrados foi realizada, porém não foram encontradas novas palavras chave relevantes, e então prosseguiu-se à próxima etapa da RBS, que é o enquadramento dos artigos baseado na leitura do título e dos resumos dos trabalhos.

A etapa de enquadramento dos artigos foi dividida em duas etapas. A primeira foi a classificação dos artigos com base na leitura do título do artigo e de seu resumo e a segunda deu-se com a leitura completa dos artigos selecionados. Esse processo foi importante para que fossem selecionados para análise apenas artigos correspondentes ao interesse do trabalho, como definida na etapa de planejamento. Muitos dos artigos encontrados durante a primeira etapa da

RBS, apesar de conterem alguma das palavras chave utilizadas para busca não são, necessariamente, relevantes ao objetivo da revisão, e por isso essa análise deve ser feita. Com a leitura dos títulos e resumos dos 240 artigos, chegou-se a um total de 75 artigos classificados para a segunda etapa, a leitura completa das publicações. Com a leitura completa dos artigos chegou-se a um total de 43 artigos relevantes para análise, o que representa aproximadamente 18% dos artigos encontrados. Uma análise detalhada sobre os objetivos, tecnologias, matérias primas, aspectos e impactos ambientais analisados pelos 43 artigos são encontrados no APÊNDICE A.

Terminada a etapa de seleção dos artigos, iniciou-se a classificação e análise dos artigos da amostra. Essa etapa visou compreender melhor os aspectos e situação atual do tema de pesquisa abordado, identificar onde a pesquisa é desenvolvida, quais pesquisadores estão interessados no assunto e onde são publicadas. Para a análise desses fatores deve-se utilizar softwares específicos, que automatizam o processo de obtenção dos dados. Para este trabalho utilizou-se o software HisCite versão 12.03.17 sendo possível classificar os artigos encontrados e analisá-los quanto a: autoria do artigo, instituição, nome do periódico/conferência em que o artigo foi publicado, ano da publicação e número de citações.

A Figura 17 mostra a evolução da produção científica sobre os trabalhos envolvendo a performance ambiental na MA entre os anos de 1999 (ano da primeira publicação encontrada) até 2016. A partir de 2010 os estudos começam a ganhar força, com publicações anuais, sendo possível traçar uma linha de tendência de crescimento acentuado no número de publicações. Analisando o período entre 2012 e 2016, observar-se que aproximadamente 75% das publicações estão concentradas nos últimos 3 anos. Apesar da tecnologia de MA não ser recente, com os primeiros equipamentos sendo comercializados a partir de 1987 (WOHLERS, 2014), somente nos últimos anos, com a redução dos custos dos equipamentos, é que a tecnologia se tornou mais acessível, com crescimento da indústria no ano de 2015 da ordem de 26% (WOHLERS,2016). Esse aumento na utilização dos processos de MA pode justificar o crescente número de artigos publicados na área nos últimos anos, principalmente relacionados a performance ambiental do processo, pois as preocupações com os impactos ambientais se tornam maiores com a massificação da utilização da tecnologia.

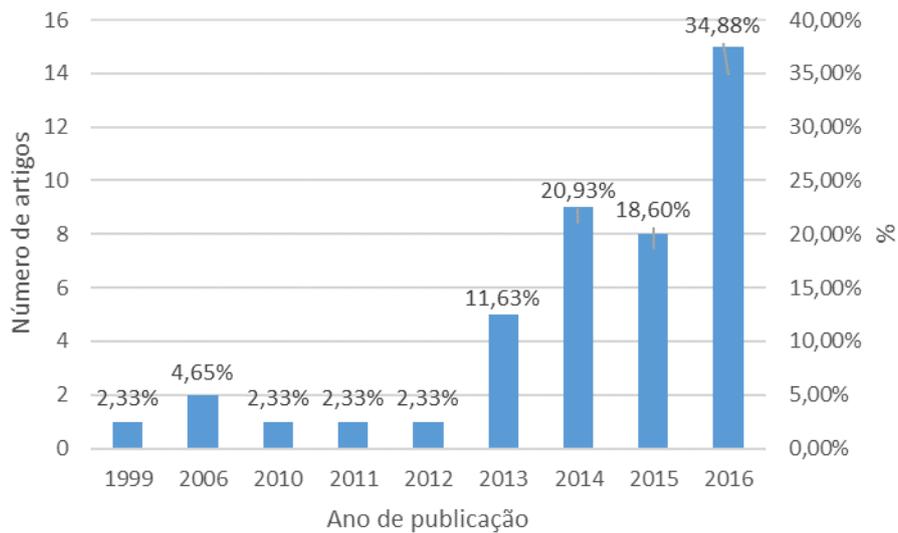


Figura 17 - Evolução das publicações sobre performance ambiental e ACV em manufatura aditiva

Fonte: Autor

A maioria dos artigos que estuda a performance ambiental da MA faz uso da teoria e de resultados empíricos para alcançar os objetivos propostos. Dos artigos analisados apenas Drizo e Pegna (2006) e Gebler, Schoot Uiterkamp e Visser (2014) realizaram estudos exclusivamente teóricos, sendo o primeiro artigo um *overview* da literatura, utilizando como base o único artigo disponível sobre o assunto até então (LUO; LEU; JI, 1999) que faz uma análise dos impactos relacionados a saúde, descarte, consumo de matéria prima e de energia na MA do tipo *Vat Photopolymerisation* (SLA). O segundo, além de um breve review de literatura, fez uma modelagem a partir de dados encontrados na literatura para estimar a variação do custo, consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub>, projetados para o ano de 2025 e dessa forma, considerando alguns cenários, tentar estimar esses impactos no futuro.

Baechler, Devuono e Pearce (2013) e Kreiger e Pearce (2013) fizeram uso dos dados coletados para, mesmo que de forma simplificada, realizar uma ACV dos processos de MA. Baechler, Devuono e Pearce (2013) utilizaram uma forma simples de ACV e estudaram a quantidade de energia e a quantidade de matéria prima de um processo de MA do tipo *Material Extrusion* para comparar os processos utilizando *High-density polyethylene* (HDPE) virgem e o HDPE reciclado obtido através do processo proposto pelo artigo, tendo como resultado uma redução no consumo de energia com a utilização do material reciclado. No artigo de Kreiger e Pearce (2013) foi realizado uma AICV (Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida) para comparar os impactos da MA do tipo *Material Extrusion* com um método de manufatura convencional de moldagem por injeção, utilizando ABS e PLA como matéria prima. Nessa AICV foram

considerados como *inputs* o consumo de energia e o material utilizado e como *output* o CED (*Cumulative Energy Demand*) e o GWP (*Greenhouse Gas Emission*), tendo como resultado uma vantagem em termos de geração de impacto para o processo de MA quanto aos impactos analisados. Faludi et al. (2015), faz um levantamento completo dos impactos ambientais, considerando a manufatura dos equipamentos utilizados para produção, todas as entradas e saídas durante a operação dos equipamentos bem como o fim de vida dos produtos e maquinário, não esquecendo de contabilizar o transporte envolvido em todas essas etapas. A partir desses dados e com o auxílio do software SimaPro e da metodologia ReCiPe Endpoint H calcularam diversos impactos ambientais como: *fossil fuel depletion, mineral depletion, human toxicity, marine ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, freshwater eutrophication, marine eutrophication, photochemical oxidants, particulate matter, climate change ecosystem impacts, climate change human health impacts, ozone depletion, terrestrial acidification, ionizing radiation, natural land transformation, urban land occupation and agricultural land occupation*. Os autores concluíram que a MA quando comparada a MC pode gerar menor impacto, mas que isso depende do perfil do usuário e das especificações dos equipamentos.

A tecnologia *Material Extrusion* foi o tipo de processo de MA mais estudado pelos artigos encontrados, esse interesse deve-se a essa tecnologia ser de menor custo de equipamento, o que popularizou a tecnologia fora do ambiente industrial e acadêmico. A *Powder Bed Fusion* ficou em segundo lugar como tecnologia mais estudada, com 4 artigos abordando equipamentos que utilizam esse processo, fato que pode ser explicado devido a tecnologia ser uma das mais utilizadas quando deseja-se fabricar peças utilizando metal como matéria prima, e por isso é de grande interesse para a indústria. A tecnologia *Material Jetting* foi utilizada por Mognol, Lopicart e Perry (2006), onde fizeram experimentos com as 3 tecnologias citadas, com o objetivo de selecionar parâmetros de fabricação que reduzissem o consumo de energia de cada um dos processos e também por Faludi et al. (2015), que comparou a tecnologia com a *Material Extrusion* e *Material Jetting* com uma manufatura convencional. Além disso, Drizo e Pegna (2006) fizeram um *review* baseado unicamente em um artigo que explora a tecnologia *Vat Photopolymerisation*.

A maioria dos artigos selecionados não apresenta destaque ao tipo de matéria prima utilizada, incluindo Mognol, Lopicart e Perry (2006) e Yoon et al. (2014) que, apesar de serem artigos que se utilizaram de experimentos com os equipamentos de MA, não citaram os tipos de materiais utilizados, muito provavelmente pelo foco das pesquisas estarem no consumo de

energia dos equipamentos, e não em numa análise mais completa dos aspectos ambientais da MA, incluindo a visão de ciclo de vida de produto. Dentre as matérias primas citadas por Baechler, Devuono e Pearce (2013), Baumers et al. (2011), Kreiger e Pearce (2013), Sreenivasan, Goel e Bourell, (2010) e Faludi et al. (2015) temos o ABS, o HDPE e o PLA, que são matéria prima nos processos de *Material Extrusion* e *Material Jetting*, e o PA-12, utilizado nos processos de *Powder Bed Fusion*.

O consumo de energia elétrica é, sem dúvida, o principal aspecto ambiental investigado nos artigos que enfocam na sustentabilidade da MA, sendo abordado por 87% dos artigos pesquisados. Mesmo artigos que utilizam alguma forma de ACV como ferramenta de pesquisa, tais como os trabalhos de Baechler, Devuono e Pearce (2013) e Kreiger e Pearce (2013) deram enfoque na questão energética, apesar da capacidade e robustez da metodologia em analisar os impactos ambientais de um processo ou produto de diferentes formas. Kreiger e Pearce (2013) e Gebler, Schoot Uiterkamp e Visser (2014) também fazem análise do GWP, com foco na emissão de equivalentes de CO<sub>2</sub>. Além disso, Gebler, Schoot Uiterkamp e Visser (2014) fazem uma análise do impacto social da utilização da MA na indústria, concluindo que a utilização da MA pode causar insegurança social em relação a redução no número de empregos, principalmente em países em desenvolvimento, visto que a utilização da MA causa mudanças na estrutura de trabalho, quando transfere a produção desses países exportadores para dentro das nações desenvolvidas. Outro foco diferente é apresentado no *overview* de Drizo e Pegna (2006), que analisa os aspectos relacionados à segurança da saúde, com possíveis impactos dependendo da matéria prima utilizada, que pode gerar gases tóxicos e causar irritação para olho e na pele, e na geração de resíduos, que devem ter um descarte ambientalmente correto.

A Tabela 4 apresenta os resultados de consumo de energia, aspecto mais estudado nos trabalhos encontrados, de alguns artigos que demonstram esses resultados de forma explícita. Como é possível observar os valores e unidades utilizados pelas publicações variam muito, sendo inviável a comparação direta entre os valores, afim de tentar determinar as diferenças de consumo de energia dos processos. Fatores como a geometria do objeto, orientação da peça, porcentagem de preenchimento, espessura das camadas, orientação das camadas, suporte, entre outros tornam a análise imprecisa.

Tabela 4 - Resultados de consumo de energia da MA encontrados nos artigos da amostra

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Material</b>	<b>Consumo de Energia</b>	<b>Unidade</b>
Jackson et al. (2016)	Direct Energy Deposition	Aço	8,97	kWh/kg
Bourhis et al. (2014)	Direct Energy Deposition	Aço	12-109	kWh/pc
Paris et al. (2016)	Direct Energy Deposition	Titânio	26,05	kWh/pc
Griffiths et al. (2016)	Material Extrusion	PLA	0,007-0,03	kWh/pc
Kreiger e Pearce (2013)	Material Extrusion	ABS e PLA	0,1-0,52	kWh/pc
Mognol; Lopicart; Perry (2006)	Material Extrusion	-	0,5-1,25	kWh/pc
Baumers et al. (2011)	Powder Bed Fusion	PA 12	56,75-66,02	kWh/kg
Baumers et al. (2013)	Powder Bed Fusion	-	0,54-1	kWh/cm <sup>3</sup>
Bourhis et al. (2013)	Powder Bed Fusion	Aço	21,48-24,2	kWh/kg
Jackson et al. (2016)	Powder Bed Fusion	Aço	18,8	kWh/kg
Mognol; Lopicart; Perry (2006)	Powder Bed Fusion	-	32-56	kWh/pc
Sreenivasan; Goel; Bourell (2010)	Powder Bed Fusion	PA 12	14,5	kWh/kg

Fonte: Autor

Alguns autores fizeram estudos sobre a influência desses fatores nos aspectos e impactos ambientais causados na utilização da MA. Barros e Zwolinski (2016) estudaram a influência do perfil do usuário da MA na geração de impactos. Ding et al. (2016) realizou um estudo sobre o trajeto de deposição e suas implicações no consumo de matéria prima. Griffiths et al. (2016) analisaram os efeitos da orientação das camadas, o perfil de preenchimento das peças e a altura de deposição no consumo de matéria prima e energia. Mognol, Lopicart e Perry (2006) estudaram a redução do consumo de energia quando alterados os parâmetros de orientação das peças, altura, espessura das camadas e utilização de suporte para impressão.

Dessa forma, para uma melhor análise das diferenças nos aspectos e impactos ambientais causados pelos processos de MA e, também, dos métodos tradicionais de manufatura, deve-se analisar os artigos que tem como objetivo essa análise comparativa, pois dentro de um mesmo trabalho a interferência das variáveis é minimizada.

Dentre os artigos que fizeram comparações entre as diferentes tecnologias de MA pode-se destacar Baumers et al. (2011) que comparou dois modelos da mesma tecnologia (*Powder Bed Fusion*) para analisar as diferenças de consumo das diversas etapas do processo de impressão (aquecimento, impressão e resfriamento), e concluiu que, para essa tecnologia, a fase de impressão é a responsável pelo maior consumo de energia durante a execução de um projeto.

Jackson et al. (2016) comparou um equipamento *Direct Energy Deposition* com outro que utilizava tecnologia *Powder Bed Fusion* e concluiu que as duas tecnologias possuíam consumo de energia total, considerando a etapa de produção da matéria prima e deposição, praticamente igual, contudo, considerando somente a etapa de impressão, a tecnologia *Direct Energy Deposition* consumiu metade da energia requerida pelo equipamento *Powder Bed Fusion*. A equivalência no consumo total deve-se ao maior consumo energético para produção dos filamentos utilizados no equipamento *Direct Energy Deposition* em relação ao pó utilizado pela tecnologia *Powder Bed Fusion*.

No artigo de Mognol, Lopicart e Perry (2006), um dos mais citados quando deseja-se ter uma referência de consumo energético das tecnologias MA, foi realizada uma análise comparativa entre 3 tecnologias diferentes: *Material Extrusion*, *Material Jetting* e *Powder Bed Fusion* (em ordem crescente de consumo de energia, os valores podem ser encontrados na Tabela 4). Com base nos resultados obtidos os autores concluíram que a característica mais importante para redução do consumo de energia dos equipamentos é a redução do tempo de impressão, afirmando ser possível reduzir o consumo de energia dos equipamentos da ordem de 45% (*Material Jetting*), 61% (*Material Extrusion*) e 43% (*Powder Bed Fusion*) com a utilização de um correto conjunto de parâmetros.

Além da comparação de consumo das diferentes tecnologias de MA outro estudo importante, visto a crescente utilização da tecnologia, é a comparação em relação as tecnologias de manufatura convencionais, tais como moldagem por injeção, forjamento, usinagem e fundição. Barros e Zwolinski (2016) realizaram uma ACV para comparar processos de manufatura aditiva e convencional, analisando a influência da experiência do usuário da MA com os impactos ambientais gerados. Com foco nos impactos *Global Warming* e *Non-Renewable Energy* os autores concluíram que a MA pode ser ambientalmente melhor em relação aos métodos convencionais, desde que o usuário da MA tenha experiência e conhecimento dos processos.

Chen et al. (2015) comparam as tecnologia de MA *Powder Bed Fusion* com o processo convencional de moldagem por injeção e concluíram que o *embodied energy* dos dois processos é semelhante para produções de até 100 peças, mas com grande vantagem para a moldagem por injeção para produções acima de 1000 peças. A relativização do tamanho da produção com o impacto causado pelo processo também é abordada por outros autores que fizeram análises comparativas entre a manufatura aditiva e convencional. Faludi et al. (2015) comparou dois

processos de MA, *Material Extrusion* e *Material Jetting*, com o processo de manufatura convencional de usinagem. Por meio de uma ACV os autores concluíram que, somando os impactos, o processo *Material Extrusion* é o menos agressivo, porém a comparação dos processos *Material Jetting* e a usinagem depende do tamanho do lote de produção. No trabalho de Kianian e Larsson (2015) foi realizada uma análise comparativa entre o processo *Vat Photopolymerisation* e a manufatura convencional de moldagem por injeção e os autores concluíram que, para uma produção de até 1000 peças, o processo de MA tem um consumo de energia menor do que o convencional, mas para uma produção acima desse valor, existe vantagem para o processo de moldagem por injeção. Senyana e Cormier (2014) comparam os processos de *Direct Energy Deposition* com o processo convencional de forja e também relacionaram o desempenho ambiental dos processos com a quantidade de peças produzidas. Yoon et al. (2014) do mesmo modo relacionaram o volume da peças produzidas com o consumo de energia. Segundo os autores, o consumo de energia do processo de MA (*Material Extrusion*), por massa depositada, é maior do que o do processo convencional de moldagem por injeção quando o volume da produção aumenta.

No trabalho publicado por Huang et al. (2016) foi realizada uma comparação da manufatura aditiva (*Powder Bed Fusion* e *Direct Energy Deposition*) com a convencional (forja, fundição e usinagem) por meio de uma AICV. Os autores concluíram que a utilização da MA pode reduzir em até 3 vezes o consumo de energia quando comparada aos métodos convencionais. Para Paris et al. (2016), que confrontou a MA com um processo convencional (fresamento), a MA pode gerar menor impacto ambiental se o volume de material necessário para um peça ser confeccionada pelo processo de fresamento dividido pelo volume final da peça, for maior ou igual a 7.

Em Hapuwatte et al. (2016), que comparou a MA com o processo convencional de forja, os autores utilizaram o método *Product Sustainability Index* (ProdSI) e concluíram que o impacto total causado pelo processo de MA, *Environmental sub-index score*, é menor do que o impacto da manufatura convencional, principalmente devido a melhor eficiência no uso de matéria prima. Kreiger e Pearce (2013) também analisaram a questão do menor consumo de matéria prima na MA, analisando a influência do preenchimento das peças impressas quando comparadas as peças produzidas através de MC que, necessariamente, devem ser sólidas, concluindo que existe uma redução na geração de impacto quando reduzido o preenchimento das peças produzidas pela MA.

A Tabela 5 apresenta um panorama de todos os artigos que utilizam a ACV como metodologia para avaliar os impactos ambientais causados pela utilização da MA. Do total de artigos pesquisados, 12,8% utilizam a ACV, todavia, se também forem considerados os artigos que fazem a ICV (Análise de Inventário de Ciclo de Vida), é observado que aproximadamente 25% dos artigos utilizam o ACV, mesmo que só até a etapa de inventário. Além disso, todos os artigos que utilizam ACV são recentes (até 2 anos de publicação). Esses fatores indicam a importância da metodologia para os estudos sobre MA e também mostra que o interesse dos pesquisadores por essa ferramenta está crescendo nos últimos anos.

No que diz respeito ao *Software* utilizado para a realização da ACV todos os artigos encontrados na amostra estudada utilizaram o SimaPro para realizar as análises. O SimaPro é uma aplicação desenvolvida no Reino Unido e o *software* mais utilizado para ACV (SPECK et al., 2016). Para a avaliação dos impactos ambientais pode-se verificar a utilização de 3 métodos de AICV: o método ReCiPe, o *Cumulative Energy Demand* e o Impact 2000+. O método ReCiPe é o sucessor dos métodos Eco-indicator 99 e CML-IA gerando um total de 18 categorias de impacto em nível *midpoint* e 3 categorias de impacto em nível de *endpoint*. O método *Cumulative Energy Demand* é classificado como *Single Issue* ou na tradução livre, de um único problema, pois só realiza análise em relação as fontes de energia. Impact 2002+ é um metodologia que propõe uma implementação que combina as categorias de *midpoint* e de *Damage*, resumindo todos os dados da análise de inventário em 14 categorias de *midpoint* e 4 de *Damage*.

Tabela 5 - Revisão dos artigos que utilizam ACV na avaliação da performance ambiental da MA

Autores	Objetivo	Manufatura Aditiva		Característica da ACV			
		Tecnologia	Material	Unidade Funcional	Dimensão	Software	Método de AICV
Barros; Zvolinski (2016)	Comparar a MA e Convencional (moldagem por injeção) por meio de ACV e analisar a influência do perfil do usuário.	<i>Material Extrusion</i>	PLA	Caneca que comporte 250ml de água fria, usado 4 vezes ao dia, por 3 anos.	Portão-ao-Túmulo	SimaPro	Impact 2002+
Faludi et al. (2015)	Comparar os impactos ambientais de 2 tipos distintos de MA com a convencional (CNC) por meio de uma ACV.	<i>Material Extrusion</i> <i>Material Jetting</i>	ABS	Fabricação de duas partes diferentes em plástico - uma complexa, como normalmente são feitas por AM, e outra uma superfície plana perfurada.	Berço-ao-Túmulo	SimaPro	ReCiPe Impact 2002+
Kreiger et al. (2014)	Realizar uma ACV de modo a verificar o melhor cenário para a reciclagem de HDPE usado como matéria prima da MA.	<i>Material Extrusion</i>	HDPE	1kg de HDPE reciclado compatível com MA e convencional.	Portão-ao-Portão	SimaPro	IPCC 2007 <i>Cumulative Energy Demand</i>
Kreiger e Pearce (2013)	Comparar a MA com a convencional (moldagem por injeção) através de uma AICV.	<i>Material Extrusion</i>	ABS PLA	Quilogramas necessário para confecção de cada peça;	Berço-ao-Túmulo	Simapro	IPCC 2007 <i>Cumulative Energy Demand</i>
Malshe et al. (2015)	Realizar uma ACV para analisar a performance ambiental de um novo tipo de equipamento SLA (Fast MIP-SL)	<i>Vat Photopolymerisation</i>	Resina Epoxy	1000 unidades de 6 diferentes peças.	Berço-ao-Portão	SimaPro	ReCiPe
Nagarajan et al. (2016)	Conduzir uma avaliação de impacto ambiental de um equipamento SLA (Fast MIP-SL) através de AICV.	Vat Photopolymerisation	Resina	1000 unidades de cada peça manufaturada.	Portão-ao-Portão	SimaPro	ReCiPe
Paris et al. (2016)	Realizar uma ACV como critério de decisão para escolha de processo de manufatura (MA x Manufatura Convencional (Fresa).	<i>Direct Energy Deposition</i>	Titânio	Turbina de Titânio composta por 13 pás com dimensão nominal de 130mm x 30mm.	Portão-ao-Túmulo	SimaPro	CML 2 Baseline 2000 Cumulative Exergy Demand

Quanto aos resultados obtidos pelos estudos de ACV, Barros e Zwolinski (2016) e Paris et al. (2016) realizam análises comparativas entre os processos de manufatura convencional e aditiva e apresentaram os resultados em forma de gráficos em uma escala de 100%, relativizando as duas manufaturas. Barros e Zwolinski (2016) compararam a tecnologia de MA *Material Extrusion* com a convencional de moldagem por injeção e a influência do conhecimento dos operadores de MA nos impactos causados. Analisaram 9 categorias de impacto, enfatizando os impactos de *Global Warming* e *Non-renewable energy* que, segundo os autores, são categorias de impactos chave para as empresas atualmente. Para essas duas categorias quando o perfil do usuário de MA é classificado como iniciante, o resultado nos impactos avaliados é favorável a manufatura convencional, porém, ao ser utilizada por um usuário experiente, a análise do artigo mostra que a MA pode ser até 45% menos impacto quando comparada a convencional. Paris et al. (2016) analisaram 10 categorias de impacto (*abiotic depletion, acidification, global warming, fresh water aquatic ecotox, marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, non-renewable fossil, non-renewable nuclear, renewable potential, e renewable water*), comparando a MA com a convencional de fresa, e concluiu que a MA pode ser ambientalmente melhor em todas as categorias analisadas, desde que, a relação entre o volume de material necessário para um peça ser confeccionada pelo processo de fresa dividido pelo volume final da peça, seja maior ou igual a 7.

Faludi et al. (2015), Malshe et al. (2015) e Nagarajan et al. (2016) apresentaram os resultados por meio de categorias de impacto do tipo *endpoint*. Faludi et al. (2015) realizaram uma ACV para determinar as diferenças dos impactos ambientais causados pela MA das tecnologias *Material Extrusion* e *Material Jetting* comparando com a manufatura convencional do tipo CNC e seus resultados foram abordados anteriormente neste manuscrito. Malshe et al. (2015) avaliou o processo de MA *Vat Photopolymerisation*, mais especificamente de um novo tipo de equipamento do tipo SLA, por meio de uma ACV. Os autores imprimiram diferentes peças para fazer a análise e concluíram que os maiores impactos estão relacionados a *Damage to human health* e *Resource depletion*, e que a geração dos impactos está relacionada a quantidade de matéria prima e tempo de impressão utilizados para confecção das peças. Nagarajan et al. (2016) realizaram uma AICV de um equipamento SLA (Fast MIP-SL) e identificaram o consumo de energia como fator de impacto dominante.

Kreiger et al. (2014) utilizou-se a ACV para identificar o melhor cenário para reciclagem de HDPE para ser utilizado como matéria prima da MA. Com os resultados obtidos os autores puderam concluir que a reciclagem realizada de forma descentralizada, ou seja, diretamente no

local onde é gerado o material e não este sendo enviado a uma central de reciclagem, é a que representa o melhor cenário do ponto de vista dos impactos ambientais, sendo a que apresentou os menores valores de *Energy demand* e *Greenhouse gas emissions*.

Como foi possível observar, dos vários trabalhos publicados que analisam a performance ambiental da MA, uma grande parte utilizou-se da metodologia da ACV para avaliar os impactos ambientais e compara-los com outros tipos de processos de manufatura convencional. Entretanto, não foram encontrados artigos comparando a MA com métodos de MC dos quais se utilizam de matéria prima reciclada nos moldes abordados neste trabalho, sendo assim, a motivação deste trabalho é preencher essa lacuna na literatura.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido em uma empresa de reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) localizada na região de Sorocaba/SP que desenvolveu filamentos de ABS reciclado para comercialização em escala. Uma parte do desenvolvimento deste trabalho teve como foco na definição dos parâmetros necessários para a obtenção de filamentos de ABS reciclado para o uso em manufatura aditiva. Essa etapa de desenvolvimento foi necessária, pois o estudo foi realizado a partir dos filamentos desenvolvidos dentro da própria empresa, dessa maneira não foi possível dar prosseguimento na coleta de dados antes de primeiro manufaturar os filamentos necessários para o estudo.

O desenvolvimento dos parâmetros de extrusão do ABS passou por diversas etapas, como definição da temperatura correta em cada sessão da extrusora, velocidade de tração dos filamentos, temperatura da água do banho de resfriamento, velocidades de alimentação e extrusão do ABS, pressão interna da massa e etc. Uma das principais dificuldades na confecção dos filamentos foi o achatamento do fio, problema que foi minimizado após diversos ensaios para o ajuste dos parâmetros. A falta de uniformidade dos filamentos implicava em problemas operacionais na impressora 3D, o que inviabilizava a aquisição dos dados da manufatura aditiva e, por consequência, o andamento deste trabalho.

#### 3.1 Definição de objetivo e escopo

##### 3.1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi realizar uma ACV comparativa entre dois tipos de manufatura, a convencional e a aditiva. Para isso, foi realizado um estudo com abrangência *cradle-to-gate* avaliando os processos de moldagem por injeção (manufatura convencional) e a impressão em 3D em equipamento FDM (manufatura aditiva). Com o desenvolvimento deste estudo e os resultados obtidos espera-se:

- Avaliar comparativamente os impactos de cada uma das manufaturas e, a partir disso, disponibilizar informações para os tomadores de decisão para que estes possam escolher processos a partir dessas informações;
- Identificar os principais *hotspots* de cada um dos processos, de forma que melhorias possam ser identificadas a partir das informações apresentadas;

- Avaliar a influência do preenchimento na manufatura aditiva das peças produzidas, analisando a interferência desta variável nos potenciais impactos gerados por este tipo de manufatura;

### 3.1.2 Função do produto

O produto utilizado para a análise comparativa foi uma peça cuja forma e dimensões podem ser vistas na Figura 18. A peça utilizada para este estudo tem como função realizar ensaios de tração segunda a norma ASTM D638-14 de modo a aferir a qualidade do material produzido (ABS reciclado) pela empresa do estudo de caso.

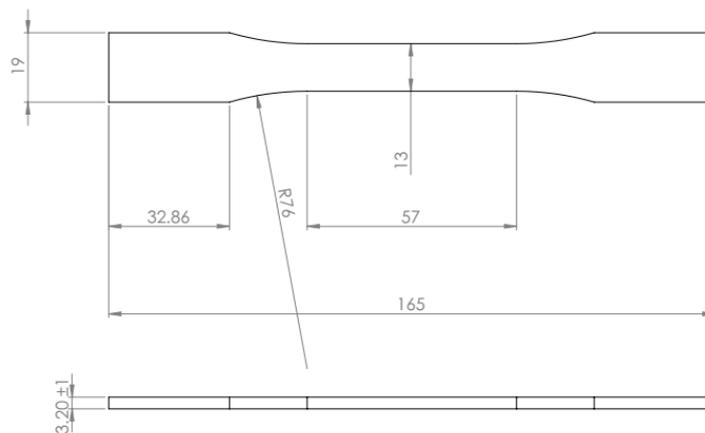


Figura 18 - Peça utilizada para o estudo comparativo entre manufatura convencional e aditiva  
Fonte: ASTM (2014)

### 3.1.3 Unidade funcional

Devido ao estudo ter abrangência *cradle-to-gate*, ou seja, não sendo estudada a fase de uso do produto, a unidade funcional adotada foi igual ao fluxo de referência que, no caso deste estudo, é a produção de uma peça como a apresentada na Figura 18.

### 3.1.4 Fluxo de referência

O fluxo de referência para este estudo foi definido como sendo igual a unidade funcional, ou seja, a produção de 1 peça como apresentada na Figura 18. Para a transformação dos dados obtidos durante a realização deste trabalho na base mássica foi necessário determinar a massa média de 1 peça para cada um dos cenários que serão abordados (moldagem por injeção (MC) e impressão 3D (MA) utilizando vários percentuais de preenchimento). A massa da peça injetada produzida através da MC foi de 8,566g ( $\pm 0,428$ ) e as massas das peças com preenchimento de 25%, 50%, 75% e 100% confeccionadas pela MA foram de, respectivamente,

6,247g ( $\pm 0,048$ ), 6,881g ( $\pm 0,054$ ), 7,536g ( $\pm 0,044$ ) e 7,912g ( $\pm 0,064$ ). A Figura 19 apresenta as diferenças entre as peças confeccionadas através da MA em seus diferentes percentuais de preenchimento.

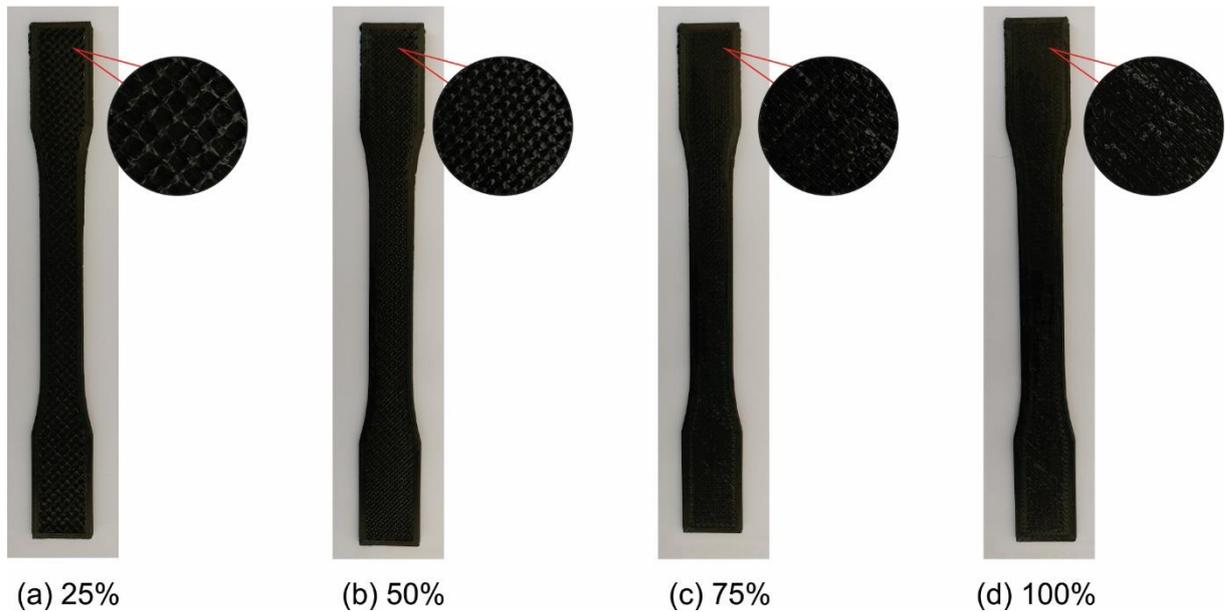


Figura 19 - Comparativo entre os diferentes preenchimentos das peças confeccionadas via MA

Fonte: Autor

### 3.1.5 Sistema de produto

Os sistemas de produto estudados podem ser vistos de maneira esquemática na Figura 20 e serão detalhados posteriormente. Os processos elementares considerados em cada sistema foram:

- Manufatura convencional: processo de picagem do material que sai da extrusora (picotador) e processo de moldagem por injeção (injetora);
- Manufatura aditiva (MA): processo de bobinar o material que sai da extrusora e processo de impressão em 3D.

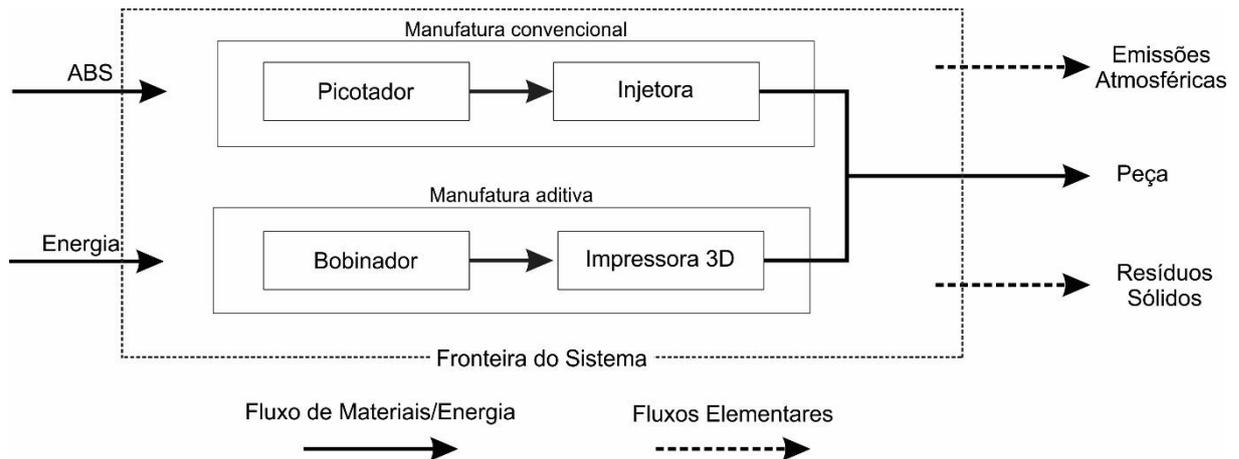


Figura 20 - Sistemas de produto estudados

Fonte: autor

O ABS que entra no sistema de produto é o ABS reciclado que sai da extrusora e é picotado no caso de ser destinado a manufatura convencional; ou então, o material é enrolado em bobinas para que possa ser utilizado no sistema da manufatura aditiva. O processo de extrusão não foi considerado como parte integrante da fronteira do sistema de produto por ser o mesmo utilizado tanto na manufatura convencional quanto na manufatura aditiva, apresentando assim os mesmos impactos nos dois cenários.

### *Picotador*

O picotador, nome utilizado pela empresa do estudo de caso para designar este equipamento, tem como função principal tracionar os filamentos que saem da extrusora ao mesmo tempo que uma lâmina corta os filamentos, formando os *pellets* que posteriormente serão utilizados na injetora. Esse equipamento é movido por energia elétrica e seu motor tem potência declarada de 3 CV. A produtividade deste equipamento é de 450kg de ABS/h. A Figura 21 apresenta o equipamento instalado na empresa.

### *Injetora*

A injetora utilizada é apresentada pela Figura 22. A moldagem por injeção é o processo que produz objetos através da injeção de matéria prima sob pressão dentro de um molde. Para realizar este processo a injetora é alimentada com energia elétrica e, além disso, outra entrada do processo é o óleo do sistema hidráulico que deve ser trocado conforme o uso (manutenção do equipamento). A injetora tem capacidade de injetar peças de até 153 cm<sup>3</sup>, pressão máxima da bomba de 16 Mpa e tem potência máxima declarada de 17,2 KW, sendo 6,2 KW de potência no sistema de aquecimento e 11 kW de potência no motor da bomba hidráulica. Para o molde

utilizado a injetora consegue injetar cerca de 103 vezes por hora, sendo seu ciclo de injeção da ordem de 35s.



Figura 21 - Imagem do picador na planta da empresa do estudo de caso  
Fonte: Autor



Figura 22 - Equipamento de moldagem por injeção (injetora) utilizado no estudo de caso  
Fonte: Autor

### *Bobinador*

O bobinador, como é referenciado o equipamento, tem a função de tracionar os filamentos que saem da extrusora, porém, diferentemente do picotador, faz o bobinamento dos filamentos em uma bobina para que possa ser utilizado na impressora 3D. Uma imagem do equipamento pode ser observada na Figura 23. A potência declarada do equipamento é de 0,33 CV e é capaz de bobinar 964,8 gramas de filamentos de ABS/h.



Figura 23 - Equipamento que realiza o bobinamento dos filamentos após a extrusão  
Fonte: Autor

### *Impressora 3D*

A impressora 3D utilizada neste estudo é do tipo FDM, com uma única cabeça de impressão e mesa aquecida, capaz de imprimir peças de até 40x40x40cm. A Figura 24 apresenta uma imagem da impressora 3D utilizada neste estudo. A impressora para realização deste trabalho encontra-se na empresa do estudo de caso.



Figura 24 - Impressora 3D utilizada para o estudo de caso

Fonte: Autor

### 3.1.6 Fronteira do sistema de produto

O sistema de produto para a manufatura convencional é detalhado na Figura 25, e apresenta como entradas o consumo de eletricidade e ABS reciclado (matéria prima nos dois processos estudados); e como fluxos elementares as emissões de gases provenientes do aquecimento e fusão do ABS e os resíduos sólidos (material descartado nas operações de limpeza do equipamento e os galhos gerados pelo molde para que ocorra o processo de injeção da peça, esses galhos correspondem aos dutos pelos quais a matéria prima se desloca para chegar até o centro do molde), além da peça manufaturada.

O sistema de manufatura aditiva é apresentado na Figura 26, e possui como entradas o consumo de eletricidade e o ABS reciclado e como saída os gases provenientes da fusão do ABS extrusado, resíduo sólido (proveniente do processo de impressão 3D) e a peça impressa.

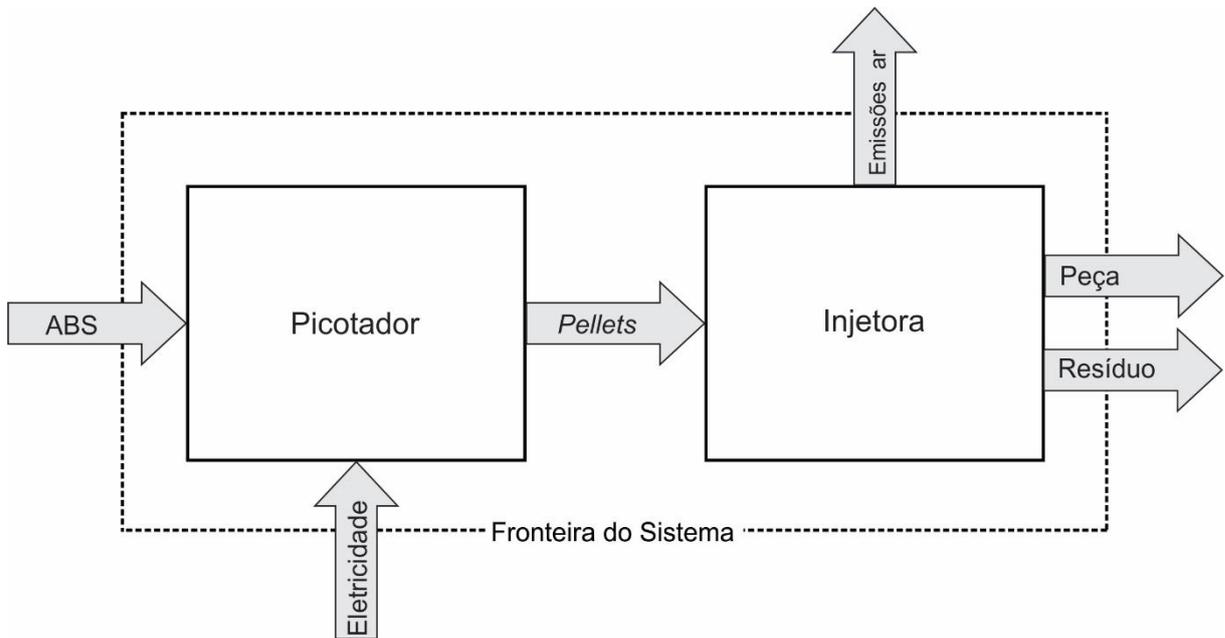


Figura 25 - Fronteira do sistema considerando a manufatura convencional  
Fonte: Autor

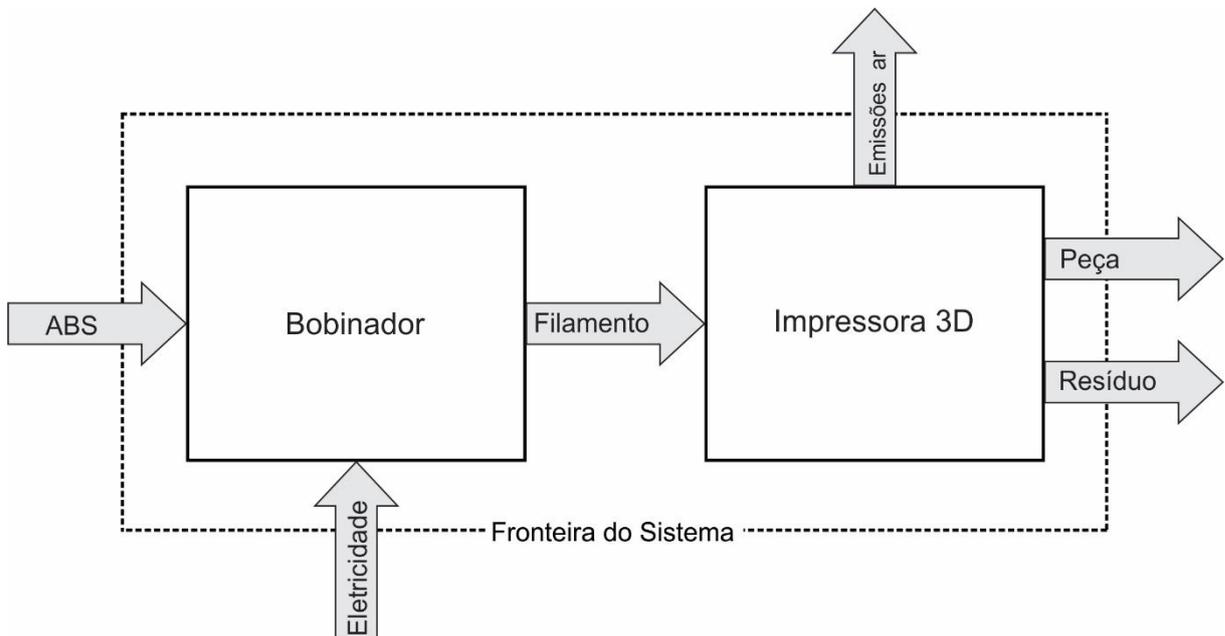


Figura 26 - Fronteira do sistema considerando a manufatura aditiva  
Fonte: Autor

### *Cobertura geográfica*

No que tange a cobertura geográfica para os dados primários a mesma é determinada de acordo com as características da indústria do estudo de caso, localizada na região de Sorocaba/SP. Para os dados secundários tem-se a eletricidade, que teve como entradas valores

referentes a produção, importação e conversão no Brasil, e para o ABS virgem foi utilizado valores médias globais de mercado.

#### *Cobertura temporal*

A cobertura temporal para a obtenção dos dados primários cobriu o período de coleta de dados, entre os meses de agosto e dezembro de 2017. Já em relação aos dados secundários, segundo consta nas informações do banco de dados ecoinvent versão 3, para a eletricidade os valores correspondem ao ano de 2012, porém com validade entre 2012 e 2016. Para o ABS virgem a validade dos dados está entre 2011 e 2016.

#### **3.1.7 Requisitos de qualidade dos dados**

Para garantir qualidade ao estudo de ACV, é item mandatário garantir a qualidade dos dados utilizados. Para isso, os dados do inventário das entradas e saídas dos sistemas estudados foram coletados de fontes primárias na empresa do estudo de caso. Os dados secundários, que não puderam ser adquiridos de maneira direta, foram obtidos com a utilização do banco de dados ecoinvent versão 3 disponível no software Simapro versão Faculty 8.4.1.4.

#### **3.1.8 Limitações**

Apesar dos esforços para garantir que o nível de detalhamento do presente estudo, algumas limitações foram encontradas e devem ser discutidas, para que futuros estudos as levem em consideração.

A primeira limitação do estudo advém da utilização dos dados da produção do ABS terem sido considerados como ABS virgem, pois não foram encontrados nos bancos de dados do *software* Simapro e na literatura os dados relacionados a produção de ABS reciclado proveniente de REEE. Os dados referentes a emissões atmosféricas também não foram considerados, devido a impossibilidade de coletar estes dados para esta pesquisa e a falta de dados em bancos de dados e literatura. Outra limitação deste estudo refere-se ao critério de corte com base mássica, que excluiu os sistemas que contribuíram com menos de 1,0% em massa no consumo de recursos, sendo esse o caso do consumo de óleo (do sistema hidráulico) utilizado na injetora, do ar comprimido para o picotador e da cola utilizada para fixar as peças na mesa de impressão da impressora 3D. Além disso vale ressaltar que os bens de capital (produção dos equipamentos) não foram incluídos na modelagem.

### 3.1.9 Tipo e formato do relatório

O relatório referente a este estudo de ACV está disposto através dessa dissertação, substituindo o relatório final. Os resultados são apresentados de acordo com a estrutura metodológica adequada, garantindo assim a correta comunicação.

### 3.2 Análise de Inventário do ciclo de vida (ICV)

A análise do inventário do ciclo de vida (ICV) consistiu na coleta e tratamento dos dados, além dos balanços de massa e energia dos sistemas estudados, como requerido pela ACV. Nesta etapa foram quantificadas todas as entradas e saídas relevantes para os sistemas estudados. Todos os dados coletados foram tratados e calculados de forma a representarem sua quantificação baseada na unidade funcional.

O levantamento dos dados necessários para a construção do inventário foi baseado na metodologia UPLCI (Unit Process Life Cycle Inventory) proposta por Kellens et al. (2012a), que tem como principal característica auxiliar a etapa de inventário com uma abordagem específica para análise da fase de uso de processos de manufatura. Para obtenção dos dados de consumo de energia dos equipamentos considerados para manufatura convencional e aditiva foi utilizado um alicate amperímetro digital com precisão de 0,01 A da marca Minipa modelo ET-3200A como mostra a Figura 27. O amperímetro foi instalado na entrada dos equipamentos e com os respectivos valores de tensão elétrica nominal (em V) de cada equipamento foi possível calcular a potência ativa (em W).



Figura 27 - Amperímetro alicate utilizado para aquisição de dados

Fonte: Autor

Para os cálculos da potência dos equipamentos avaliados foram utilizadas as equações (1) e (2), dependendo do tipo de ligação elétrica do equipamento, sendo a equação (1) utilizada para os equipamentos monofásicos e (2) para equipamentos trifásicos.

$$P = U \times I \quad \text{eq. (1)}$$

Onde:

P = Potência do equipamento (W)

U = Tensão (V)

I = Corrente elétrica (A)

$$P = 3 \times U_F \times I_F \times FP \quad \text{eq. (2)}$$

Onde:

P = Potência do equipamento (W)

$U_F$  = Tensão na fase do alimentador (V)

$I_F$  = Corrente de cada fase do circuito (A)

FP = Fator de potência do equipamento

Com os valores de potência de cada um dos equipamentos e o tempo de operação foi possível calcular o consumo de energia (Wh) de cada um dos equipamentos.

Afim de melhorar os resultados de consumo de energia que foram considerados para a confecção do inventário, o consumo dos equipamentos foi dividido por cada modo de operação/etapa do processo de cada um dos equipamentos, conforme sugerido por Kellens et al. (2012a). Para o bobinador e picotador foram considerados somente o modo de operação (quando o equipamento está em funcionamento).

A injetora foi dividida nos seguintes modos de operação/etapa do processo:

- *Stand-by*: Modo em que o equipamento não está operando, apenas com a unidade de controle ligada.

- Aquecimento: Compreende o período em que o equipamento tem seu sistema de aquecimento ligado, até que atinja a temperatura ideal de trabalho.

- Carregamento/limpeza: Processo executado em todo o início de operação, responsável pelo preenchimento do sistema de injeção e também remoção de material residual que possa estar dentro do sistema.

- Injeção: Consiste no processo de injeção propriamente dito, onde o material é injetado dentro do molde e ejetado como peça pronta.

Para a impressora 3D foram considerados os seguintes modos de operação/etapa do processo:

- *Stand-by*: Estado em que a impressora não está operando, apenas com seu painel eletrônico ligado.

- Carregamento do filamento: Processo em que o filamento é carregado do lado externo até a cabeça de impressão, que também contempla um aquecimento da cabeça de impressão específico, de modo a permitir a impressão assim que se inicie o processo.

- Aquecimento da mesa: Neste modo acontece o aquecimento da mesa de impressão, o que irá garantir que a peça não descole da mesa durante o processo de impressão.

- Pré- impressão: Consiste em uma sequência de etapas executadas pela impressora de modo a garantir o correto posicionamento da cabeça em relação a mesa (calibração).

- Aquecimento da cabeça de impressão: Modo em que a cabeça de impressão se aquece imediatamente antes do processo de impressão.

- Impressão: Modo de operação em que as peças são impressas.

- Descarregamento do filamento: Semelhante a modo de carregamento, consiste no processo em que o filamento é ejetado da impressora, o que ocorre normalmente em todo final de expediente da máquina.

Dessa maneira, foi possível identificar, separadamente, a influência de cada um dos modos de operação dos equipamentos nos impactos potenciais de cada processo em estudo. Como foi possível observar, para os dois tipos de manufatura, existem semelhanças quanto aos modos de operação. Ambos os equipamento passam por um período de *stand-by*, onde é feito o *setup* do equipamento e passam por um período de aquecimento, para que o material possa ser fundido. Na MA esse modo inclui subdivisões, pois primeiramente é feito o aquecimento da mesa de impressão, o que irá garantir a aderência do material depositados, após essa etapa tem-se a pré-impressão e por último o aquecimento da cabeça de impressão. Outra diferença entre os processos está no descarregamento dos equipamentos, sendo que para a MA este é feito ao final de cada expediente e, para a MC, esta etapa dá-se no início de cada jornada de produção.

### 3.2.1 Inventário para o sistema de manufatura convencional

Para a confecção deste inventário foram considerados alguns cenários, considerando o tamanho do lote a ser produzido. Dessa maneira, estão representados no inventário entradas e saídas referentes a produção de 7, 14, 50 e 100 peças, sendo que 7 peças é a quantidade de peças confeccionadas pela MA e, por isso, foi usada como passo inicial para análise. Para os demais valores de tamanho de lote, foram estimados valores de produção maiores para que fosse possível observar a influência desse parâmetro nos impactos gerados. Além disso, foi necessário a aplicação de um estudo de tempo de operação em cada um dos modos de operação dos equipamentos, consumo de energia em cada modo e o consumo total de materiais, como descrito por Kellens et al. (2012b). Como resultado do estudo de tempo de operação, a Tabela 6 mostra a distribuição média relativa de cada uma das etapas do processo de injeção no tempo total do processo, considerando a divisão apresenta no item 4.2 (*Stand-by*, aquecimento, carregamento/limpeza e injeção). Foi possível observar a redução na contribuição do tempo dos modos *stand-by*, aquecimento e carregamento/limpeza ao passo que aumentou-se o tamanho do lote a ser produzido, e a contribuição de tempo do processo de injeção também aumentou. Isso deve-se ao fato de que quanto maior a quantidade de peças produzidas, maior o tempo que o equipamento requer para injetar as peças e conseqüentemente altera a distribuição de tempo da maneira observada.

Tabela 6 - Modos de operação e distribuição média relativa do tempo - Manufatura Convencional

Modo de Operação	Tempo (%)				
	Tamanho de Lote (Peças)	7	14	50	100
Stand-by		4,0%	3,7%	2,7%	1,9%
Aquecimento		80,7%	74,5%	53,6%	38,5%
Carregamento/limpeza		7,1%	6,5%	4,7%	3,4%
Injeção		8,2%	15,2%	39,1%	56,2%

Fonte: Autor

A Tabela 7 apresenta o inventário para esse sistema em função da unidade funcional de 1 peça produzida. Todos os dados apresentados são de fonte primária, ou seja, coletados durante a pesquisa e calculados através das equações (1) e (2). Como visto na Tabela 6 a diferença entre a distribuição no tempo de cada um dos modos de operação faz com que o inventário se altere com a mudança do tamanho de lote produzido. Conforme o tamanho de lote aumenta, diminui

o consumo de cada um dos modos de operação que são fixos e não variam com o tamanho do lote, como é o caso dos modos *stand-by*, aquecimento e carregamento/limpeza. Esse processo ocorre pela diluição da contribuição de cada modo de operação uma vez que o inventário contabiliza o consumo de energia elétrica necessária para produção de 1 peça, que foi a unidade funcional escolhida para este estudo, e quantos mais peças são produzidas em um mesmo lote, maior será o denominador dessa divisão. Além da energia elétrica, o consumo de ABS e a geração de resíduos no processo são reduzidos com o aumento do tamanho de lote, uma vez que no início do processo de fabricação de um lote uma quantidade de material deve ser descartada, e essa quantidade é mais diluída entre as peças produzidas conforme aumenta-se o tamanho do lote. Ressalta-se que o equipamento injeta no mesmo molde 6 corpos de prova distintos, e não somente o corpo de prova utilizado, dessa maneira, todas as entradas e saídas foram ponderadas, aplicando-se uma divisão dos dados pela massa referente a cada um dos corpos de prova injetados a cada etapa de injeção.

Tabela 7 - Resultado da análise de inventário para o processo de manufatura convencional

FLUXOS DE ENTRADA	Unidade Funcional (Unidade/Peça)				Unidade
	Tamanho de Lote (Peças)	7	14	50	
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>					
<b>Energia Elétrica</b>					
Injetora					
<i>Stand-by</i>	11,27 (±0,74)	5,63 (±0,37)	1,58 (±0,10)	0,79 (±0,05)	Wh
<i>Aquecimento</i>	66,24 (±1,41)	33,12 (±0,70)	9,27 (±0,20)	4,64 (±0,10)	Wh
<i>Carregamento/limpeza</i>	19,73 (±1,30)	9,86 (±0,65)	2,76 (±0,18)	1,38 (±0,09)	Wh
<i>Injeção</i>	23,01 (±1,51)	23,01 (±1,51)	23,01 (±1,51)	23,01 (±1,51)	Wh
Picotador	0,44 (±0,02)	0,26 (±0,01)	0,14 (±0,01)	0,12 (±0,01)	Wh

### **CONSUMO DE MATERIAIS**

ABS	53,687 (±2,628)	32,542 (±1,571)	17,317 (±0,809)	14,357 (±0,661)	g
-----	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---

<b>FLUXOS DE SAÍDA</b>	<b>Unidade Funcional (Unidade/Peça)</b>				<b>Unidade</b>
<b>Tamanho de Lote (Peças)</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	

### **SAÍDA PRINCIPAL**

<b>1 Peça</b>	-	-	-	-	-
---------------	---	---	---	---	---

### **EMISSÕES**

#### **Emissões para o solo**

Resíduos de ABS <sup>1</sup>	45,121 (±2,199)	23,976 (±1,142)	8,751 (±0,381)	5,791 (±0,233)	g
------------------------------	--------------------	--------------------	-------------------	-------------------	---

<sup>1</sup> – Resíduos de ABS não foram contabilizados para etapa de Avaliação de Impactos pois estes são reciclados internamente na unidade.

Fonte: Autor

### **3.2.2 Inventário para o sistema de manufatura aditiva**

O inventário de ciclo de vida para o sistema de manufatura aditiva, da mesma forma que para a manufatura convencional, foi desenvolvido com base em alguns cenários de produção, porém diferentemente da manufatura convencional, para a aditiva foram variados os percentuais de preenchimento, de forma a analisar a influência deste parâmetro nos resultados. Em termos de quantidade de peças fabricadas, para o caso da MA foram impressas 7 peças em cada batelada. Para este sistema também foi utilizada a metodologia proposta por Kellens et al. (2012), executando a divisão das etapas do processo de impressão de acordo com o item 4.2, dessa maneira foi possível confeccionar a Tabela 8, a qual apresenta a distribuição relativa de cada uma das etapas do processo de impressão em 3D no tempo total de impressão. Na Tabela 8 pode-se observar o aumento da contribuição do modo de operação de impressão conforme aumenta-se o preenchimento da peça, isso deve-se ao fato de que quanto maior o preenchimento da peça impressa, maior o tempo de impressão que é executado pelo equipamento. Da mesma maneira todos os outros modos de operação sofrem uma redução pois são fixos, e independem do preenchimento das peças impressas.

Tabela 8 - Modos de operação e distribuição média relativa do tempo - Manufatura Aditiva

<b>Modo de Operação</b>	<b>Tempo (%)</b>				
	<b>Preenchimento (%)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>
Stand-by		1,2%	1,2%	1,1%	1,1%
Carregamento do filamento		2,5%	2,4%	2,3%	2,2%
Aquecimento da mesa		25,4%	24,3%	23,2%	22,3%
Pré-impressão		1,0%	1,0%	0,9%	0,9%
Aquecimento da cabeça de impressão		0,6%	0,6%	0,6%	0,5%
Impressão		68,0%	69,4%	70,8%	71,9%
Descarregamento		1,2%	1,2%	1,1%	1,1%

Fonte: Autor

A Tabela 9 apresenta o inventário para esse sistema de manufatura aditiva em função da unidade funcional. Todos os dados apresentados são de fonte primária, ou seja, coletados durante a pesquisa e calculados através das equações (1) e (2). Ao analisarmos os resultados da análise de inventário para a manufatura aditiva observa-se o aumento do consumo de energia elétrica para fabricação de cada peça quando aumenta-se o preenchimento, isso deve-se ao fato de que, conforme observado na Tabela 8, o tempo de impressão aumenta quando cresce a taxa de preenchimento das peças impressas. Da mesma forma o consumo de matéria prima aumenta quando existe o incremento no preenchimento das peças, entretanto a quantidade de resíduo gerada permanece a mesma, independente do preenchimento da peça. Isso deve-se ao fato de que, na manufatura aditiva, a geração de resíduos deve-se exclusivamente ao material ejetado pelo equipamento em seu carregamento e descarregamento e no aquecimento da cabeça, sendo essas etapas do processo independentes do preenchimento definido para a peça a ser produzida.

Tabela 9- Resultado da análise de inventário para o processo de manufatura aditiva

<b>FLUXOS DE ENTRADA</b>	<b>Unidade Funcional (Unidade/Peça)</b>				<b>Unidade</b>
<b>Preenchimento (%)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>					
<b>Energia Elétrica</b>					
Impressora 3D					
<i>Stand-by</i>	0,06 (±0,01)	0,06 (±0,01)	0,06 (±0,01)	0,06 (±0,01)	Wh
<i>Carregamento do filamento</i>	2,20 (±0,04)	2,20 (±0,04)	2,20 (±0,04)	2,20 (±0,04)	Wh
<i>Aquecimento da mesa</i>	21,62 (±0,45)	21,62 (±0,45)	21,62 (±0,45)	21,62 (±0,45)	Wh
<i>Pré-impressão</i>	0,92 (±0,02)	0,92 (±0,02)	0,92 (±0,02)	0,92 (±0,02)	Wh
<i>Aquecimento da cabeça de impressão</i>	0,55 (±0,01)	0,55 (±0,01)	0,55 (±0,01)	0,55 (±0,01)	Wh
<i>Impressão</i>	58,58 (±1,15)	62,31 (±1,23)	66,57 (±1,31)	70,30 (±1,38)	Wh
<i>Descarregamento</i>	1,10 (±0,02)	1,10 (±0,02)	1,10 (±0,02)	1,10 (±0,02)	Wh
					Wh
Bobinador	0,87 (±0,06)	0,95 (±0,06)	1,04 (±0,07)	1,09 (±0,07)	Wh
<b>CONSUMO DE MATERIAIS</b>					
ABS	6,335 (±0,048)	6,968 (±0,054)	7,624 (±0,044)	8,000 (±0,064)	g
<b>FLUXOS DE SAÍDA</b>					
<b>FLUXOS DE SAÍDA</b>	<b>Unidade Funcional (Unidade/Peça)</b>				<b>Unidade</b>
<b>Preenchimento (%)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	
<b>SAÍDA PRINCIPAL</b>					
<b>1 Peça</b>	-	-	-	-	-

## EMISSÕES

### Emissões para o solo

Resíduos de ABS <sup>1</sup>	0,087 (±0,08)	0,087 (±0,08)	0,087 (±0,08)	0,087 (±0,08)	g
------------------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	---

<sup>1</sup> – Resíduos de ABS não foram contabilizados para etapa de Avaliação de Impactos pois estes são reciclados internamente na unidade.

Fonte: Autor

### 3.3 Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV)

Para a AICV foram utilizados três métodos dos mais citados conforme a revisão de literatura do item 2.3.7, sendo os métodos: Impact 2002+ v2.14 (Barros e Zwolinski, 2016; Faludi et al., 2015); Recipe 2006 (Faludi et al., 2015; Malshe et al., 2015; Nagarajan et al., 2016) e o método *Cumulative energy demand* (CED) v1.09 (Kreiger et al., 2014; Kreiger e Pearce, 2013; Paris et al., 2016). No software SimaPro, foi utilizada a versão Recipe 2016 Midpoint (H) v1.00 que é uma atualização e expansão da versão anterior do método Recipe (2008).

Dentre as categorias de impacto resultantes da avaliação dos métodos Impact 2002+ e Recipe 2006, a de maior relevância na literatura mostrou-se a categoria aquecimento global, que foi a categoria de impacto mais debatida nos artigos encontrados durante a revisão bibliográfica. Kreiger et al. (2014) e Kreiger e Pearce (2013) utilizaram-se do método de avaliação de impacto IPCC 2007 GWP 100a para calcular esta categoria de impacto e, Barros e Zwolinski (2016), não só enfatiza essa categoria em seu estudo como afirma ser essa uma categoria chave para as indústrias. Para o método CED foi utilizada a somatória de todas as categorias de impacto como modo para avaliação e comparação dos resultados, sendo essa a abordagem utilizada pelos artigos encontrados durante a revisão de literatura que utilizaram o método CED (Kreiger et al., 2014; Kreiger e Pearce, 2013; Paris et al., 2016).

Como visto no item 3.1.8 deste trabalho, que trata das limitações do estudo, não foram encontrados dados detalhados de inventário do ABS proveniente da reciclagem de REEE para que fossem feitas as análises e, portanto, foram utilizadas as informações de bancos de dados que tratam da produção do ABS virgem. Afim de corrigir essa limitação e trazer os dados mais próximos possíveis para a realidade foram utilizados os resultados apresentados no trabalho de Mendes Campolina et al. (2017) que afirma que o processo de reciclagem do ABS proveniente de REEE emite 87% menos CO<sub>2</sub> e consome 90% menos energia quando comparado aos dados de produção do ABS virgem. O trabalho desenvolvido por Mendes Campolina et al. (2017) foi

realizado na mesma empresa do estudo de caso, o que garante maior precisão na utilização de seus dados.

## 4 RESULTADOS

Neste item serão discutidos os resultados referentes aos potenciais impactos para os sistemas avaliados.

### 4.1 Potencial de aquecimento global (PAG)

Os resultados obtidos na comparação da avaliação de impacto do ciclo de vida da manufatura convencional e aditiva para o potencial de aquecimento global (PAG) são apresentados na Tabela 10, sendo possível observar os resultados utilizando cada um dos métodos, ReCiPe 2016 e Impact 2002+. Os valores encontrados quando comparamos os dois métodos possuem diferença, sendo o valor do impacto resultante do método Impact 2002+ aproximadamente 80% do valor encontrado para o método ReCiPe 2016, como pode ser observado nas Figura 28 e 29.

Tabela 10 - Comparação entre o potencial de aquecimento potencial da manufatura convencional e aditiva

<b>Potencial de Aquecimento Global (kg CO<sub>2eq</sub>)</b>				
<b>Preenchimento (%)</b>	<b>Manufatura aditiva</b>			
	25%	50%	75%	100%
<b>Impact 2002+</b>	1,97E-02 (± 1,77E-04)	2,07E-02 (± 3,53E-04)	2,19E-02 (± 3,29E-04)	2,28E-02 (± 3,42E-04)
<b>Recipe 2016</b>	2,47E-02 (± 3,70E-04)	2,60E-02 (± 4,16E-04)	2,74E-02 (± 3,57E-04)	2,86E-02 (± 4,00E-04)
<b>Tamanho do lote (peças)</b>	<b>Manufatura Convencional</b>			
	7	14	50	100
<b>Impact 2002+</b>	5,14E-02 (± 2,42E-03)	3,09E-02 (± 1,45E-03)	1,37E-02 (± 5,90E-04)	1,33E-02 (± 5,72E-04)
<b>Recipe 2016</b>	6,29E-02 (± 2,89E-03)	3,78E-02 (± 1,85E-04)	1,67E-02 (± 7,83E-04)	1,63E-02 (± 7,48E-04)

Fonte: Autor

Apesar da diferença entre os métodos, observa-se que esta é proporcional. Esse fato deve-se aos dois métodos utilizarem o IPCC como base para construção dos fatores de caracterização de PAG. Dessa maneira, para compararmos as duas manufaturas, foram utilizados os valores encontrados pelo método ReCiPe 2016, por se tratar de um método mais recente e atualizado, que utiliza os dados do IPCC de 2013, mais atuais que o do IPCC 2001 utilizado pelo método Impact 2002+.

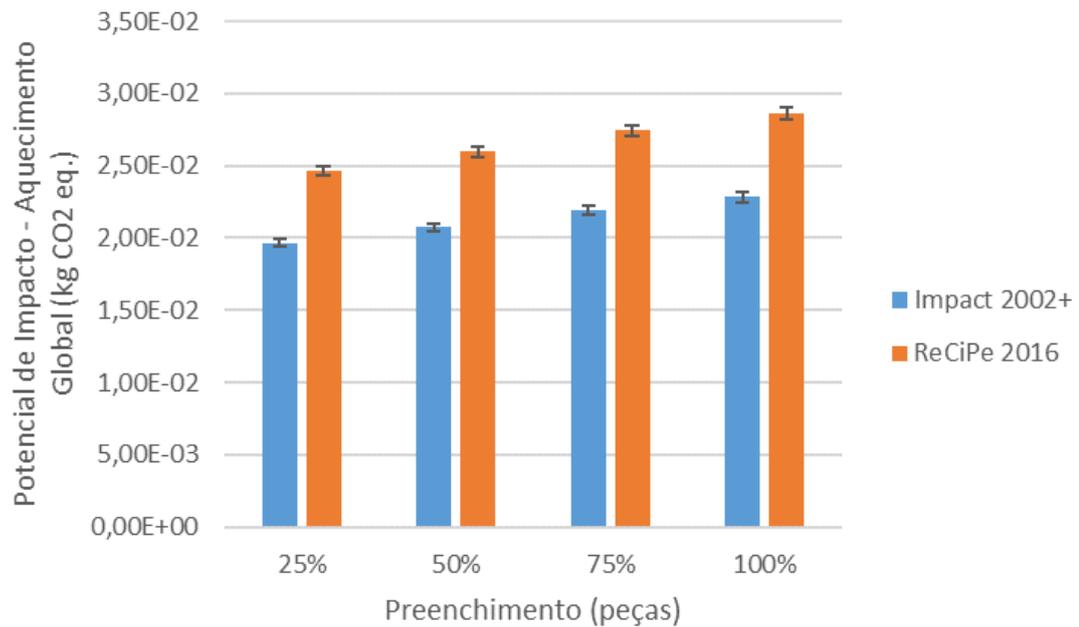


Figura 28 - Potencial de aquecimento global - Manufatura aditiva  
Fonte: Autor

Para a MA, analisando a Figura 28 podemos observar as diferenças no PAG devido as diferenças entre a porcentagem de preenchimento da peça impressa. A diferença entre as peças com preenchimento 25% e 50%, 50% e 75% e 75% e 100% foram de, aproximadamente, 5%. Essa pequena diferença entre o PAG mesmo com a variação do preenchimento da peça deve-se principalmente as características da peça impressa, que por ter uma altura de impressão baixa, com 3,2 mm, sofre pequena influência tanto no consumo de matéria prima, quanto no tempo de impressão. Observa-se na Tabela 9 que a diferença de consumo de matéria prima entre os diferentes preenchimentos é de, aproximadamente 9%, e a diferença no consumo de energia, variável dependente do tempo de impressão e, conseqüentemente, do preenchimento da peça, fica em cerca de 5%.

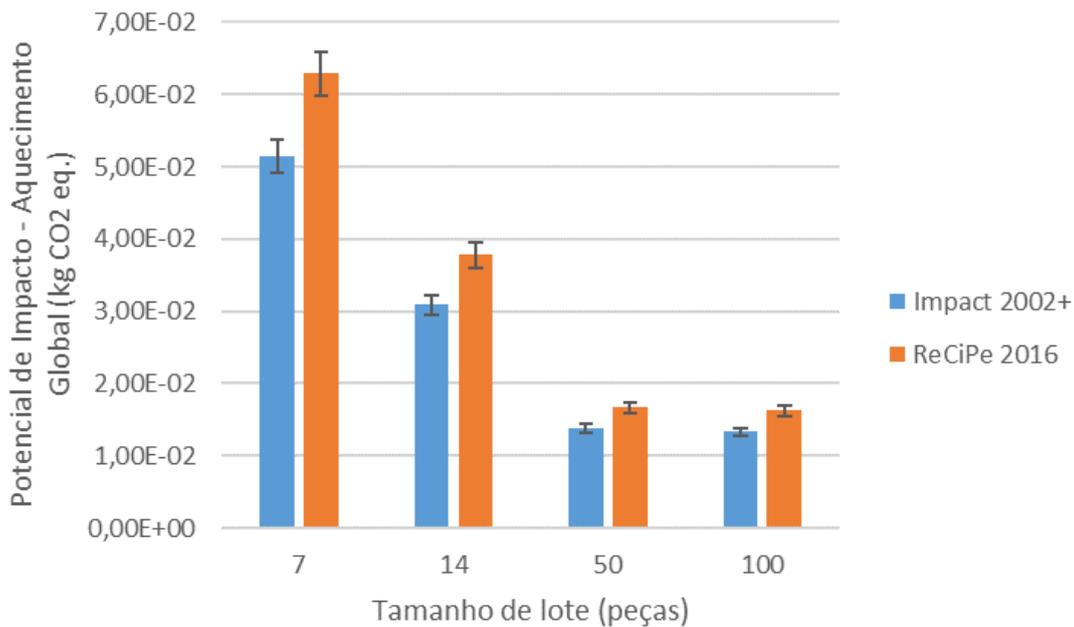


Figura 29 - Potencial de aquecimento global - Manufatura convencional  
Fonte: Autor

Na Figura 29 é possível observar acentuada redução no PAG da manufatura convencional, principalmente quando variados os tamanhos de lote de 7 para 14 e para 50. Quando aumenta-se o tamanho de lote de 7 para 14 peças o PAG reduz em 40%, e para 50 peças a redução foi de 56% em relação ao processo de produção de 14 peças. Essa redução ocorre principalmente devido ao fato de que o aumento no número de peças produzidas por lote reduz muito o consumo de matéria prima por lote, além de reduzir o consumo de energia elétrica por peça produzida. Pela Tabela 7 observa-se uma redução proporcional no consumo de energia elétrica nas etapas de *stand-by*, aquecimento e carregamento/limpeza conforme o aumento no número de peças produzidas no lote, ou seja, quando se dobra o tamanho do lote, diminui-se pela metade o consumo dessas etapas do processo, isso deve-se ao fato de que esse consumo de energia é dividido diretamente pelo número de peças produzidas. Para o picotador a redução de consumo de energia elétrica não é linear, reduzindo em 40%, 56%, 15% o consumo de energia quando aumenta-se o tamanho do lote, respectivamente, de 7 para 14, de 14 para 50 e de 50 para 100 peças. O mesmo raciocínio se faz presente quando analisou-se o consumo de matéria prima, que tem redução no mesmo patamar que a redução de consumo de energia do picotador, justamente devido a massa de matéria prima descartada a cada início de processo na etapa de carregamento/limpeza. Apesar da queda acentuada, até a produção de 50 peças não se observa o mesmo comportamento a partir deste ponto. Quando analisou-se a diferença do PAG para 50

e 100 peças a diferença foi de apenas 2,5%. Isso pode ser explicado justamente por essa diluição no consumo de matéria prima que é descartada no início de processo, pois quanto mais aumentasse o denominador, menos esse fator torna-se relevante. Para tamanhos de lotes maiores do que 100 peças as diferenças tornam-se irrelevantes, sendo esse o ponto em que o PAG torna praticamente constante.

A Figura 30 apresenta a curva de PAG da MC conforme a variação dos lotes e, sobreposto ao gráfico, estão os valores de PAG referentes a MA em seus diversos valores de preenchimento, possibilitando assim comparar os dois tipos de manufatura, visto que para a MA não apresentou variações do PAG por tamanho de lote por esse ser indiferente para o cálculo do PAG na MA. É possível observar que existe um ponto de intersecção das curvas, onde a MC passa a ter um PAG menor do que a MA. Observa-se que para o tamanho de lote de 7 e 14 peças, a MA possui PAG menor do que a MC em qualquer um dos preenchimentos utilizados, entretanto, a partir de 50 peças, a MC tem um PAG maior do que qualquer preenchimento estudado na MA.

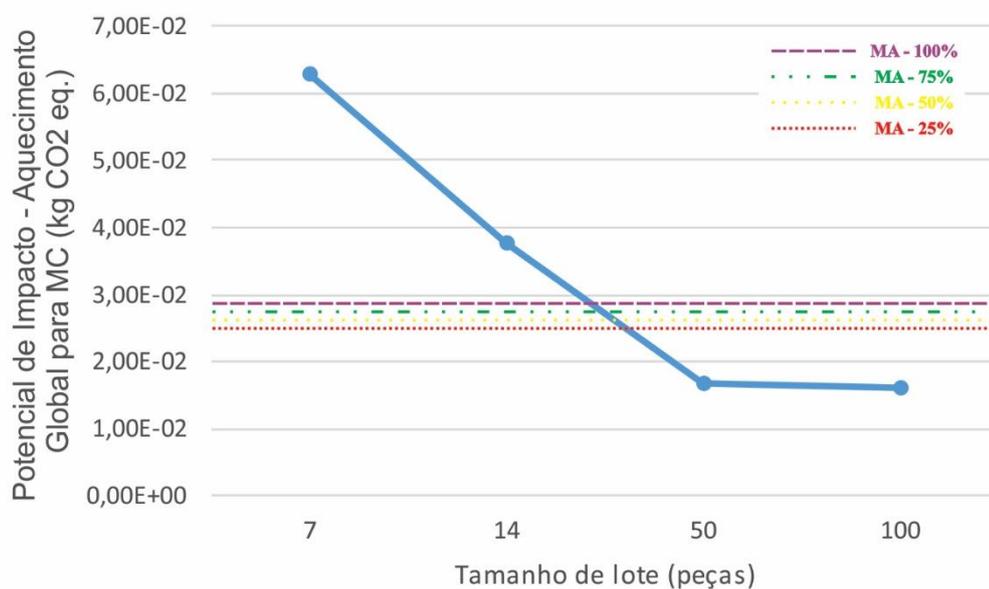


Figura 30 - Comparativo entre o PAG da manufatura convencional e aditiva

Fonte: Autor

Esses resultados estão de acordo com os encontrados na literatura. O trabalho de Yoon et al. (2014) comparou o consumo de energia da MA (FDM) com dois tipos de manufatura convencional (moldagem por injeção e a fresa), e concluiu que a manufatura aditiva apresentou um *specific energy consumption* (SEC) menor, dependendo do tamanho do lote. No caso específico do artigo de Yoon et al. (2014) a MA passou a não ser a que consumia menos energia

a partir de 5 peças, sendo que depois desse valor a MC tornava-se mais econômica em termos de consumo de energia. De modo semelhante Senyana e Cormier (2014) compararam o MA (*Directed Energy Deposition*) com a MC (Forja) e relacionaram o desempenho ambiental com a quantidade de peças produzidas. Kianian e Larsson (2015) compararam a moldagem por injeção com o processo *Vat Photopolymerisation* de MA e concluíram que o consumo de energia elétrica era favorável a MA até a produção de 1000 peças e, partir deste volume de produção, a MC tornava-se a de menor consumo de energia. Para Faludi et al. (2015) que realizou um estudo de ACV e comparou dois tipos de equipamentos de MA com o processo de usinagem, a MA apresentou um desempenho ambiental melhor dependendo do tamanho do lote da produção, e que essa variável mostrou-se importante para a realização desta análise. Chen et al. (2015) avaliaram o *embodied energy* dos processos de MA e da moldagem por injeção e, para o estudo realizado, concluiu que para uma produção de até 100 peças os valores encontrados para os dois tipos de manufatura eram equivalentes, porém a partir de 1000 peças, a vantagem do ponto de vista do *embodied energy* era superior para o processo de MC. Como pode ser visto os resultados encontrados neste trabalho estão em concordância com a literatura quando compara-se a MA com a convencional e avalia-se a influência do tamanho de lote na comparação.

Com a utilização da metodologia UPLCI pode-se avaliar o impacto de cada uma das etapas de operação dos equipamentos e a influência de cada um deles na geração de impactos potencial. As Figuras 31 e 32 demonstram os valores do PAG dos dois processos por modo de operação e também o consumo de matéria prima na geração de impactos potenciais.

Analisando a Figura 31 pode-se perceber que a etapa de impressão é a que mais gera impacto, seguida pela etapa de aquecimento da mesa e pelo consumo de matéria prima. O valor elevado da etapa de impressão deve-se ao fato de que, além de ser a etapa que consome mais tempo durante a produção das peças, além do movimento da cabeça de impressão e da manutenção de temperatura para fusão do ABS, manter a mesa da impressora aquecida consome grande quantidade de energia. Esse fato é corroborado pela etapa de aquecimento ser a segunda maior geradora de impacto para este processo. A etapa de aquecimento da mesa consome grande quantidade de energia elétrica, não só pelo alto consumo das resistências como também pelo tempo que o equipamento leva para deixar a mesa aquecida. Nesse ponto vale ressaltar que, aparentemente, a impressora conta com um único sensor de temperatura, que fica junto as resistências, dessa maneira para garantir que toda a mesa esteja aquecida o período de aquecimento possui tempo fixo. Caso houvessem sensores nas extremidades da mesa o tempo

de aquecimento poderia ser reduzido, o que diminuiria o consumo de energia elétrica nesta etapa do processo.

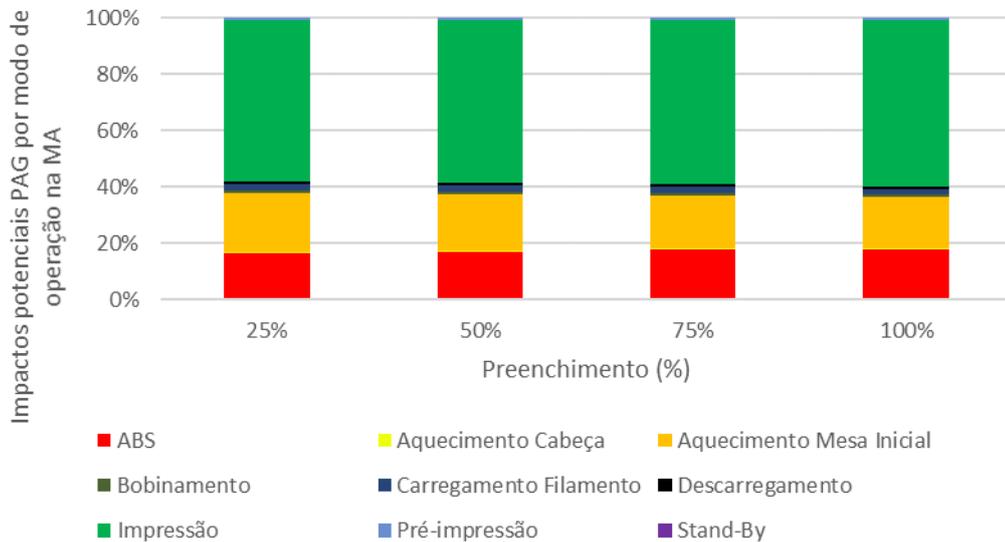


Figura 31 - Contribuição dos modos de operação e matéria-prima na geração de PAG da MA

Fonte: Autor

O consumo de matéria-prima é o terceiro gerador de impacto na MA, bem diferente comparado a MC, como poderá ser visto mais adiante. Isso deve-se ao fato da MA gerar pouco ou quase nenhum resíduo, sendo este fator o maior contribuinte para que alguns autores considerem a MA um tipo de manufatura com melhor desempenho ambiental quando comparada a outros tipos de manufatura. Ressalta-se a pouca variação na distribuição dos impactos por modo de operação quando variou-se o preenchimento pois, como visto na Tabela 9, os valores de consumo de energia para todos os modos, com exceção do modo de impressão, são fixos e, além disso, existe pouca alteração na massa das peças produzidas com diferentes preenchimentos.

Para a moldagem por injeção, independentemente da quantidade de peças produzidas, o consumo de matéria-prima é o principal gerador de PAG. Esse grande consumo de matéria-prima deve-se ao fato da necessidade de limpeza do equipamento, o que acaba por gerar muito resíduo, mas principalmente pela geração dos chamados “galhos”, que são os dutos por onde o material deve percorrer dentro no molde até preenche-lo e gerar a peça final. Essa quantidade de material desperdiçado nos “galhos” representa, para este caso, cerca de 33% da massa da peça produzida, ou seja, para cada peça produzida, pelo menos uma peça e um terço em massa de matéria-prima foram consumidos. Conforme o aumento do lote, diminui a influência das

etapas de aquecimento, *stand-by* e carregamento. Isso deve-se ao fato desses valores serem diluídos com o aumento do número de peças produzidas, e com o aumento do tamanho de lote, toda geração de PAG acaba por se resumir ao consumo de matéria prima e a etapa de injeção. Diferentemente do processo de MA estudado, na moldagem por injeção os maiores consumos não provem do aquecimento, mas sim dos motores e bombas hidráulicos. Segundo o manual do fabricante a potência do sistema de aquecimento é de 6,2 kW, enquanto os motores possuem potência declarada de 11 kW.

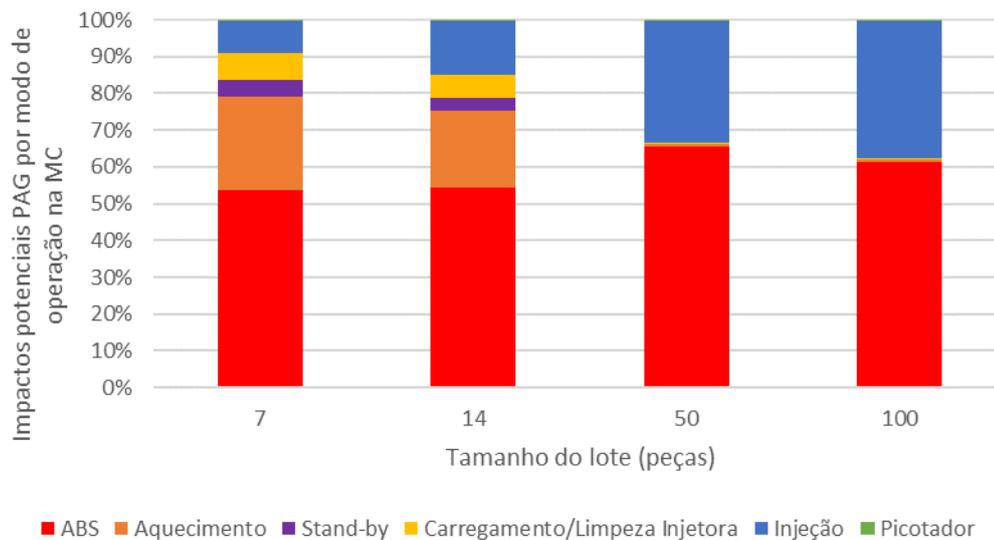


Figura 32 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima na geração de PAG da MC  
Fonte: Autor

#### 4.2 Cumulative energy demand (CED)

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos na AICV comparando os resultados da MC e MA para o *Cumulative energy demand* (CED) que foi um dos métodos de avaliação de impacto utilizados pelos autores que realizaram AICV em estudos voltados a performance ambiental da MA. Paris et al. (2016) utilizou a somatória de quatro impactos gerados pelo CED juntamente com seis categorias de impacto do método CML 2 Baseline 2000 para comparar os resultados entre a MA e MC. De maneira semelhante Kreiger e Pearce (2013) utilizaram valores acumulados das categorias de impacto geradas pelo método CED para avaliar a MA e comparar com a MC. Kreiger et al. (2014) também utilizaram valores somados gerados pelas categorias de impacto do CED para comparar a reciclagem de HDPE utilizada na confecção de filamentos para MA. Dessa maneira, esse trabalho irá utilizar a soma das seis categorias de impacto geradas pelo método CED, *Non renewable (fóssil)*, *Non-renewable (nuclear)*, *Non-renewable*

(biomass), Renewable (biomass), Renewable, (wind, solar, geothermal) e Renewable, (water), para comparação dos resultados entre a MA e MC.

Tabela 11 - Comparação entre os valores gerados pela análise do CED da manufatura convencional e aditiva

<i>Cumulative energy demand (MJ eq.)</i>				
<b>Preenchimento (%)</b>	<b>Manufatura aditiva</b>			
	25%	50%	75%	100%
<b>CED (MJ eq.)</b>	0,73 (± 0,01)	0,76 (± 0,01)	0,80 (± 0,01)	0,84 (± 0,01)
<b>Tamanho do lote (peças)</b>	<b>Manufatura Convencional</b>			
	7	14	50	100
<b>CED (MJ eq.)</b>	1,47 (± 0,07)	0,88 (± 0,04)	0,38 (± 0,02)	0,36 (± 0,02)

Fonte: Autor

As Figuras 33 e 34 indicam os valores encontrados na avaliação do método CED para as MA e MC, respectivamente. Pela Figura 33 pode-se observar que, para a MA, conforme aumenta-se o preenchimento das peças impressas, o CED também aumenta. Aumentando o preenchimento de 25% para 50%, o valor de CED aumenta em 4,1%. Para o aumento de 50% para 75%, têm-se um aumento de 5,2% no valor gerado pelo CED. Quando o preenchimento passa de 75% para 100% o aumento no CED é de 5%. Essa pequena diferença nos valores de CED conforme aumenta-se o preenchimento das peças deve-se em geral pela pequena diferença no tempo de impressão para os diferentes preenchimentos. Para a MC a Figura 34 apresenta os valores obtidos na análise de CED em função do tamanho de lote produzido pela injetora. Quando aumenta-se o tamanho de lote de 7 para 14 peças houve uma redução de 40% nos valores de CED. Alterando o tamanho de lote de 14 para 50 peças a redução do CED é de 56,8% e aumentando o tamanho de lote de 50 para 100 peças tem-se uma redução de 5,4%. As diferenças encontradas nos valores obtidos quando varia-se o preenchimento da MA e o tamanho de lote da MC é muito próximo ao encontrado quando avaliamos o PAG, o que mostra um alinhamento dos resultados e as afirmações feitas na avaliação dos resultados de PAG também são válidas para o CED.

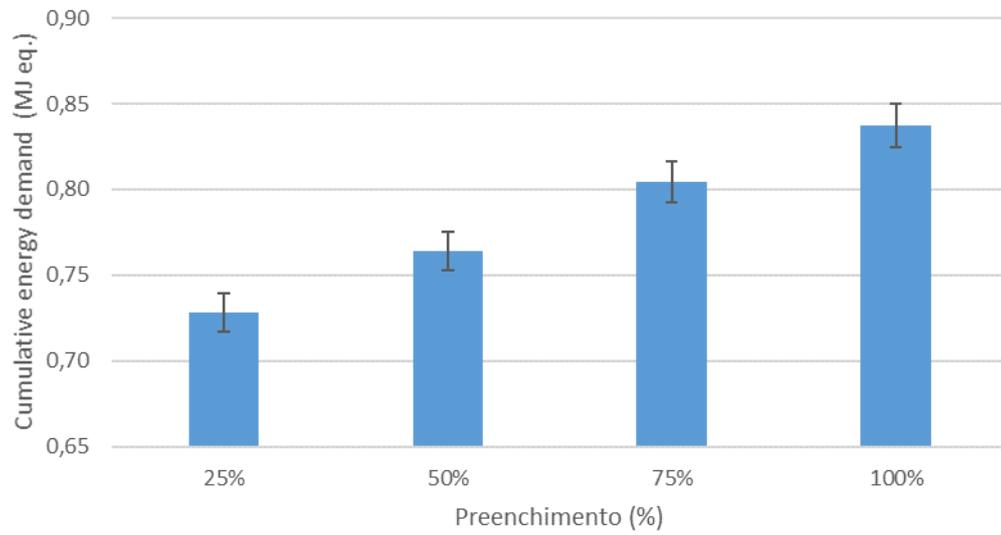


Figura 33 - *Cumulative energy demand* para a Manufatura Aditiva

Fonte: Autor

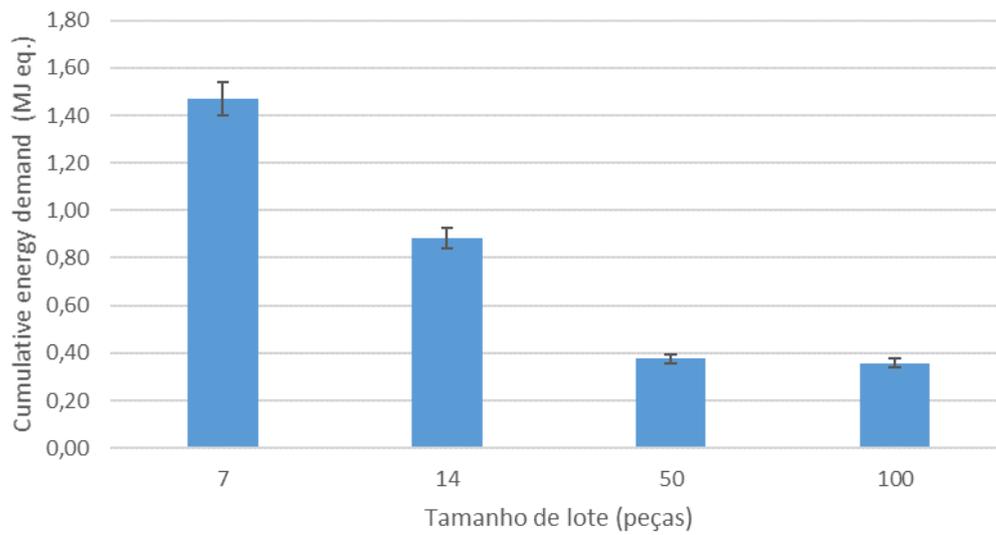


Figura 34 - *Cumulative energy demand* para a Manufatura Convencional

Fonte: Autor

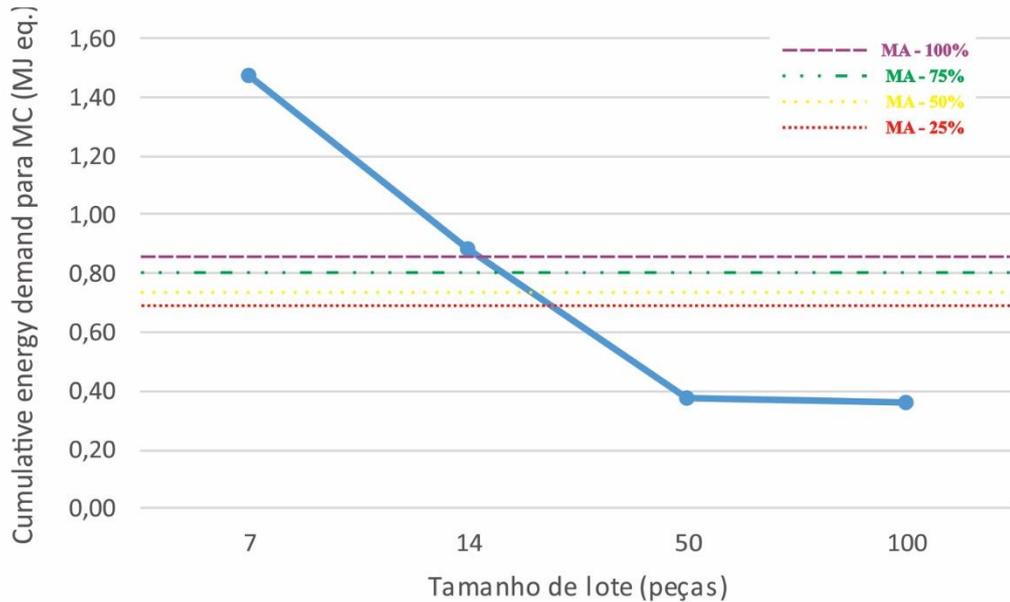


Figura 35 - Comparativo entre o CED da manufatura convencional e aditiva

Fonte: Autor

De maneira análoga ao que foi realizado no estudo dos valores de PAG a Figura 35 apresenta a curva dos valores de CED referentes a MC e, sobreposto a este gráfico, estão representados os valores de CED para a MA, sendo cada uma das linhas uma representação dos diversos preenchimentos, sendo possível assim determinar a intersecção em que os valores de CED da MC e MA. Os valores encontrados no Figura 35 são semelhantes ao da Figura 30 e mostram que, a partir de um tamanho de lote de 14 peças a MC gera um menor valor de CED quando comparado a MA. Nenhum dos artigos estudados que utilizaram-se do CED realizou estudo com variações no tamanho de lote da MC pra comparar com a MA. Como visto na revisão de literatura apresentada no item 2.3.5, Paris et al. (2016) analisaram os valores de CED em conjunto com os valores encontrados através do método CML 2 Baseline 2000 para definir uma razão entre o volume de material requerido para que uma peça possa ser confeccionada pelo processo de fresa dividido pelo volume final da peça, de forma que o impacto gerado pela MA fosse menor do que o gerado pela MC. Kreiger e Pearce (2013) utilizaram os método CED e calcularam o PAG através do ILCD 2007 e concluíram que a MA pode gerar menores impactos principalmente pela capacidade de alterar-se o preenchimento das peças impressas, não sendo necessário a confecção de peças sólidas, como na MC.

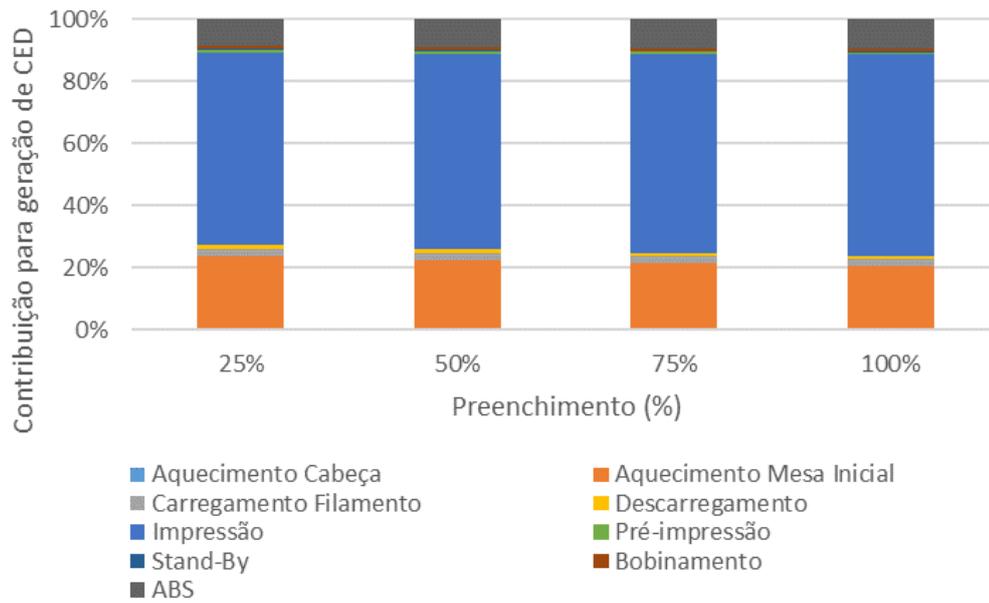


Figura 36 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MA

Fonte: Autor

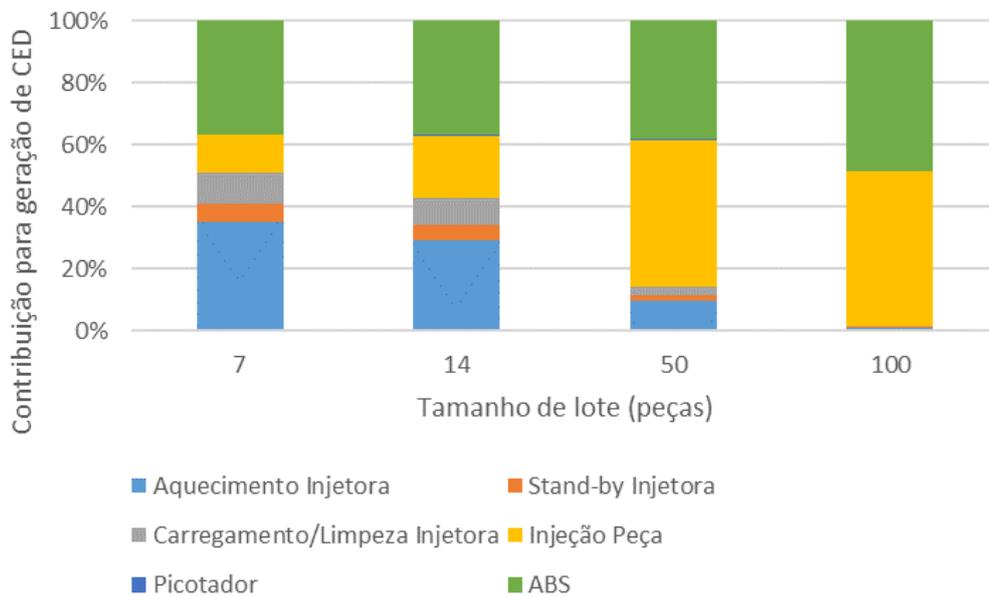


Figura 37 - Contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MC

Analogamente as Figuras 31 e 32, que foram utilizadas para avaliar o impacto de cada uma das etapas de operação dos equipamentos e sua influência na geração de PAG, as Figuras 36 e 37 foram confeccionadas para avaliar o peso de cada etapa de operação tanto da MA quanto

da MC para o CED. Além disso, as figuras também mostram a contribuição do consumo de matéria prima para a geração de valores totais de CED.

A Figura 36 apresenta a contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MA e, analisando-a, pode-se observar que a etapa de impressão das peças é o processo que mais gera impacto no método CED, seguido pela etapa de aquecimento inicial da mesa. As mesmas observações feitas na avaliação do PAG também valem para essa análise, sendo a etapa de impressão que consome maior quantidade de energia elétrica principalmente devido ao tempo de impressão e o aquecimento da mesa que, devido a limitações na aquisição dos valores de temperatura ao longo da área da mesa, faz com que esse processo de aquecimento se estenda por muito tempo, acarretando em um maior consumo de energia elétrica.

Os valores de contribuição dos modos de operação e matéria prima nos resultados de CED da MC são apresentados pela Figura 37. Diferentemente do que ocorreu quando foi analisado o PAG, para os valores de CED o maior valor encontra-se na etapa de injeção da peça, sendo que, apenas para o tamanho de lote de 100 peças é que os valores referentes ao consumo de matéria prima ficaram próximos. Apesar de, como destacado na análise de PAG, o consumo de matéria prima ser o maior gerador de impacto, para os resultados de CED o valor total gerado pelo consumo de energia elétrica na etapa de injeção superou o consumo de ABS. As outras etapas da MC (aquecimento, *stand-by* e carregamento) tem sua contribuição reduzida conforme aumenta-se o tamanho do lote fabricado, pelo mesmo motivo abordado na análise do PAG, a diluição desses conforme aumenta-se o tamanho do lote.

### **4.3 Análise dos ensaios mecânicos de tração**

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados no laboratório da empresa de estudo de caso, em um equipamento Instron 3366 com capacidade de carga de 10 kN, velocidade máxima de 500 mm/min e com 1193 mm de espaço vertical para teste. Para os ensaios mecânicos foram avaliadas 5 amostras de cada um dos 3 lotes impressos, totalizando 15 testes para cada preenchimento avaliado. Para a peça injetada foram avaliadas 5 peças, conforme a norma ASTM D638-14. Dos resultados obtidos através dos ensaios realizados foram analisados o limite de resistência a tração (LRT) que mede a capacidade de um material suportar carga de alongamento até a sua ruptura. O LRT é dado dividindo a força perpendicular aplicada ao corpo de prova pela área da seção transversal do corpo de prova (ASTM, 2014). A unidade do limite de resistência a tração é dada em MPa. Além disso foram analisados os resultados de alongamento de ruptura, valor dado em porcentagem que mede o alongamento do material até

a sua ruptura durante o teste. As propriedades mecânicas de limite de resistência a tração e alongamento na ruptura são apresentadas pela Figura 38, e mostram um crescimento no LRT à medida que aumenta-se o preenchimento das peças impressas. O incremento no preenchimento das peças impressas aumenta a massa da peça e conseqüentemente reduz os vazios dentro de cada peça, o que melhora a capacidade do corpo de prova em resistir a tração. Quando comparou-se a LRT da peça impressa com 100% de preenchimento e a peça injetada existe um maior LRT para a peça injetada da ordem de 19%, ou seja, mesmo a peça impressa com o máximo de preenchimento ainda possui uma resistência relativamente menor do que a peça injetada. Isso deve não só a diferença de massa entre as duas peças, mas também a interação intermolecular do material. Nas peças injetadas existe um direcionamento das cadeias, ou seja, no momento da injeção as cadeias ficam estiradas no sentido da injeção, o que melhora os resultados de LRT. Para as peças impressas isso não ocorre, pois as cadeias estão apenas depositadas umas sobre as outras, de maneira enovelada (LEIGH, 2012).

Quando analisado o alongamento de ruptura observa-se, analogamente ao LRT, que o aumento do preenchimento das peças faz com que a peça se alongue mais antes de seu rompimento. Comparando as peças impressas com 100% de preenchimento com as peças injetadas observa-se que as peças injetadas podem alongar-se até 3x mais do que as impressas. Essa grande diferença nesse item deve-se também pela diferença de massa e a diferença de interação intermolecular, fazendo com que as peças impressas não tenham um comportamento de uma peça sólida, mas sim como se cada camada se alongasse de maneira individual, e, devido ao alongamento ser proporcional a espessura da parede que está sendo deformada, essa diferença acaba tornando-se alta quando comparadas. Para um melhor entendimento deste processo as Figuras 39 e 40 apresentam a visão frontal e lateral das fraturas sofridas pelos corpos de prova durante o ensaio de tração.

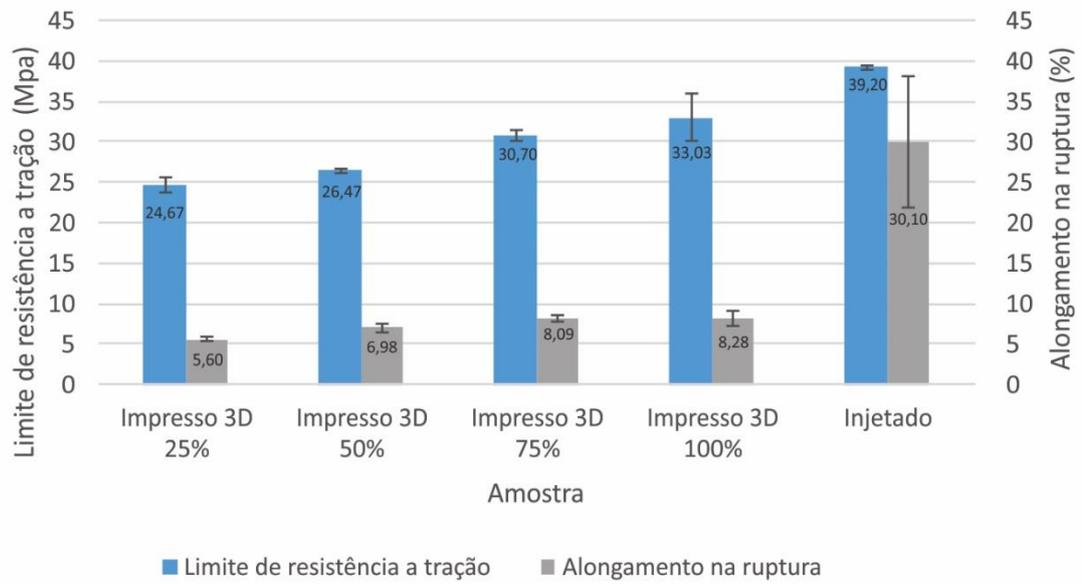


Figura 38 - Propriedades mecânicas das peças impressas e injetadas  
Fonte: Autor

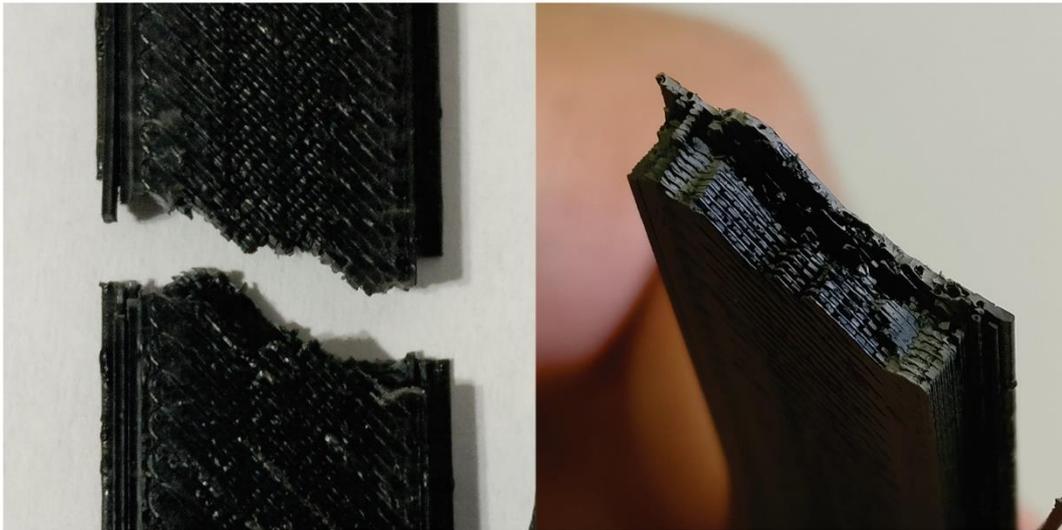


Figura 39 - Visão frontal e lateral da fratura do corpo de prova produzido através da MA após ensaio de tração  
Fonte: Autor

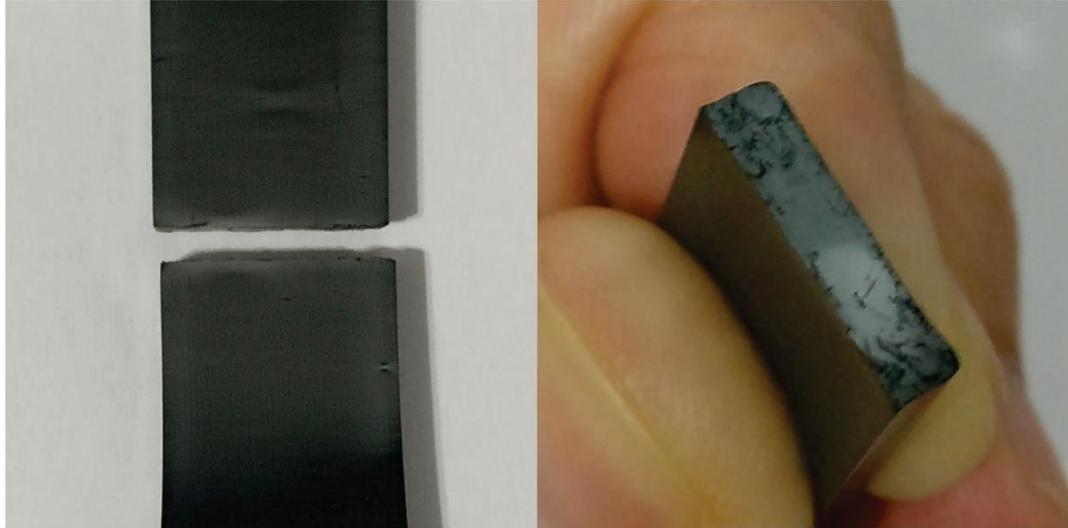


Figura 40 - Visão frontal e lateral da fratura do corpo de prova produzido através da MC após ensaio de tração  
Fonte: Autor

Como pode ser visto no item 4.1, o aumento no PAG gerado quando alterado o preenchimento das peças impressas em 25%, 50%, 75% e 100% foi de, aproximadamente 5%. No caso das propriedades mecânicas das peças impressas pode-se observar que, no limite de resistência a tração, o aumento da resistência conforme aumentamos o preenchimento das peças de 25% para 50% foi de 7,3%, enquanto o alongamento na ruptura teve um acréscimo de 24,6%. Entre as peças com 50% e 75% foi observado um aumento na LRT e no alongamento na ruptura de, aproximadamente, 16%. Quando avaliou-se as peças de 75% e 100% observa-se um aumento na LRT e alongamento na ruptura de, respectivamente 7,6% e 2,4%. Quando analisados o PAG gerado e o LRT das peças impressas, observa-se que o aumento percentual do PAG é menor do que o ganho no LRT, o que, de maneira geral, representa que o ganho de resistências das peças impressas é maior do que a perda gerada do ponto de vista ambiental, ao menos no que diz respeito ao PAG. O alongamento a ruptura também obteve crescimento acima do aumento dos impactos gerados, com exceção da peça impressa a 100% que teve um aumento percentual menor que o aumento do PAG. De maneira geral pode-se dizer que os ganhos nas propriedades mecânicas das peças impressas com um maior preenchimento superam o aumento da carga ambiental gerada por esse aumento, ao menos para a categoria de impacto avaliada. Para melhor visualização deste fenômeno a Figura 41 apresenta um indicador de ecoeficiência atrelado a resistência mecânica. Esse indicador é a relação entre a o LRT em MPa e o PAG gerado em kg CO<sub>2</sub> eq. Pode-se observar que o aumento no preenchimento das peças impressas

melhora o indicador, ou seja, a qualidade da peça impressa em termos de LRT em função do PAG gerado tem seu ponto de melhor relação para a peça impressa a 100%.

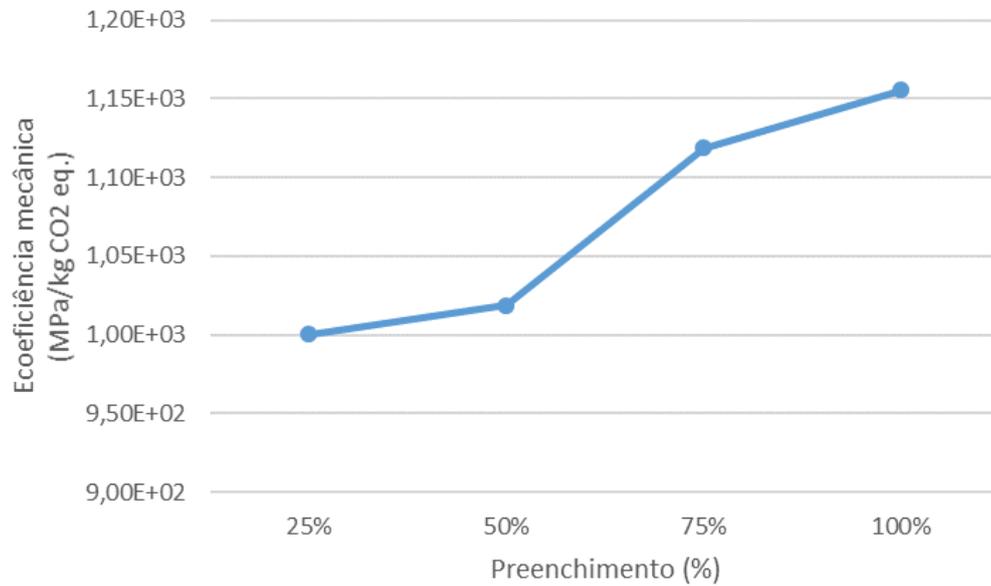


Figura 41 - Indicador de Ecoeficiência mecânica em função do preenchimento das peças geradas pela MA

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou, por meio da revisão de literatura, a importância dos estudos envolvendo a manufatura aditiva no âmbito da sustentabilidade. Devido à grande expansão na utilização da manufatura aditiva estudos sobre os impactos ambientais que o uso deste tipo de manufatura pode causar tornam-se relevantes, não só para o meio acadêmico mas para a população e órgãos públicos em geral.

Como foi observado, existem diversos trabalhos publicados na área, em sua maioria com ênfase para o consumo de energia dos equipamentos, considerados um dos *hotspots* desse tipo de manufatura, devido as características do processo. Estudos comparativos entre a manufatura convencional e aditiva tornam-se relevantes visto o potencial de mudança dos métodos tradicionais de manufatura em detrimento a manufatura aditiva. A MA tem sido divulgada por muitos como um método menos agressivo ao meio ambiente devido a sua característica de gerar uma menor quantidade de resíduos em relação a métodos tradicionais, contudo existem alguns *trade-offs* a serem analisados e a afirmação de que a MA gera menor impacto ambiental nem sempre é verdadeira.

As análises do potencial de aquecimento global (PAG) e os valores totais gerados através da soma dos impactos calculados pelo método CED mostraram que a MA apresentou menor impacto ambiental quando comparado ao MC de moldagem por injeção, para o caso analisado, desde que o tamanho de lote produzido na MC seja maior ou igual a 50 peças.

Também foram identificados os *hotspots* dos processos, ou seja, quais as etapas são as maiores responsáveis pela geração de impactos ambientais. No caso da MA tanto a avaliação do PAG quanto dos valores do CED mostraram que a etapa de impressão é a maior geradora de impacto, seguida pela etapa de aquecimento da mesa e, em terceiro lugar, o consumo de matéria prima. Esse resultado é atribuído a etapa de impressão ser a mais longa do processo de impressão, sendo que nessa etapa estão em funcionamento todos os sistemas da impressora (aquecimento de cabeça, motores e aquecimento da mesa de impressão). Para a etapa de aquecimento tem-se a dificuldade em medir a temperatura em toda a superfície da mesma, o que faz com que o aquecimento tenha um tempo fixo e prejudique o consumo desta etapa do processo. O consumo de matéria prima foi o terceiro gerador de impacto devido a pequena quantidade de matéria prima que gera resíduo. Para a MC a avaliação do PAG mostrou que a etapa de injeção é a maior responsável em causar impacto, seguido pelo consumo de matéria prima. A etapa de injeção torna-se a maior responsável pelo consumo de energia elétrica do

equipamento justamente pela necessidade de manutenção de temperatura para a fusão do material a ser injetado, além do sistema hidráulico, que movimenta toda a parte mecânica do processo, tendo inclusive o sistema de motores para acionamento do sistema hidráulico potência declarada quase 80% maior do que a do sistema de aquecimento. Em segundo lugar ficou o consumo de ABS devido a massa das peças geradas que, diferentemente das peças impressas, só podem ser feitas com preenchimento total além da grande quantidade de resíduos gerados quando comparado a MA. Grande parte desses resíduos vem dos “galhos” de injeção que correspondem aos dutos por onde o material passa até chegar ao molde específico da peça. Na avaliação do CED a etapa de injeção do processo de MC passa a ser o elemento que mais gera impacto, seguido do consumo de ABS. Como o CED avalia a demanda de energia necessária aos processos, apesar do alto consumo de ABS, o consumo de energia que também é elevado para esse processo torna-se o mais relevante quanto a geração de impactos.

Avaliando-se as propriedades mecânicas das peças resultantes da MA e da MC foi possível observar, como esperado, uma melhor resistência mecânica conforme aumenta-se a massa de material aplicado para a confecção de cada peça. No caso da LRT a diferença entre a peça impressa com melhor índice, a com 100% de preenchimento, teve um desempenho 19% inferior quando comparada a peça injetada. Para o alongamento na ruptura a diferença entre a peça impressa com maior preenchimento e a peça injetada foi de, aproximadamente, 300%. A diferença nos valores do LRT encontrados nas peças deve-se não somente a diferença de massa entre as peças produzidas através das MC e MA mas principalmente devido interação intermolecular a qual essas peças são submetidas. No caso das peças injetadas existe um direcionamento das cadeias, fazendo com que as mesmas fiquem estiradas no sentido da injeção, o que não ocorrer com as peças impressas, já que para estas as cadeias encontram-se enoveladas. Além disso, a relevante diferença nos valores de alongamento na ruptura deve-se principalmente à falta de homogeneidade das peças impressas, fazendo com que cada filamento depositado comporte-se de maneira individualizada e, como o alongamento é proporcional a espessura da parede do corpo de prova que está sendo submetido ao teste, a diferença nos valores acaba por tornar-se elevada.

Por fim, com a confecção do indicador de ecoeficiência mecânica, foi possível observar que os ganhos nas propriedades mecânicas das peças impressas com maior preenchimento superam o aumento da carga ambiental gerada pelo maior preenchimento..

## 6 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: 2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: 2009 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14001**: 2015 Sistemas de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, 2015.
- ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, n. 1–3, p. 385–388, 2001.
- BAECHLER, C.; DEVUONO, M.; PEARCE, J. M. Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 2, p. 118–125, 2013.
- BALOGUN, V. A.; OLADAPO, B. I. Electrical Energy Demand Modeling of 3D Printing Technology for Sustainable Manufacture. **International Journal of Engineering International Journal of Engineering J**, v. 29, n. 7, p. 954–961, 2016.
- BARROS, K. D. S.; ZWOLINSKI, P. Influence of the Use/User Profile in the LCA of 3d Printed Products. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 318–323, 2016.
- BAUMERS, M. et al. Sustainability of additive manufacturing: measuring the energy consumption of the laser sintering process. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 225, n. 12, p. 2228–2239, 2011.
- BAUMERS, M. et al. Transparency Built-in. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 3, p. 418–431, jun. 2013.
- BEIGBEDER, J. et al. Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorted by high resolution near infrared devices. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 78, p. 105–114, 2013.
- BOLDIZAR, A.; MÖLLER, K. Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 81, n. 2, p. 359–366, 2003.
- BOURHIS, F. LE et al. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 9–12, p. 1927–1939, 2013.
- BRERETON, P. et al. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of Systems and Software**, v. 80, n. 4, p. 571–583, 2007.
- 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.

CHEN, D. et al. Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 615–625, 2015.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. [s.l.: s.n.].

CHUA, C. K.; LEONG, K. F. **3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping**. [s.l.] World Scientific Publishing Co Inc, 2014.

CURRAN, M. A. Report on Activity of Task Force1 in the Life Cycle Inventory Programme: Data Registry – Global Life Cycle Inventory Data Resources. **Int J LCA**, v. 11, n. October 1998, p. 284–289, 2006.

DESPEISSE, M.; FORD, S. The role of additive manufacturing in improving resource efficiency and sustainability. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v. 460, n. 3, p. 129–136, 2015.

DING, D. et al. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 942–952, 2016.

DRIZO, A.; PEGNA, J. Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date. **Rapid Prototyping Journal**, v. 12, n. 2, p. 64–71, 2006.

ELDUQUE, A. et al. Environmental impact analysis of the injection molding process: Analysis of the processing of high-density polyethylene parts. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 80–89, 2015.

FALUDI, J. et al. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 1, p. 14–33, 2015a.

FALUDI, J. et al. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 1, p. 14–33, 2015b.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, out. 2009.

GEBLER, M.; SCHOOT UITERKAMP, A. J. M.; VISSER, C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. **Energy Policy**, v. 74, n. C, p. 158–167, 2014.

GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. [s.l.] Springer, 2010. v. 238

GRIFFITHS, C. A. et al. A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 74–85, 2016.

GUINÉE, J. B. et al. Quantitative life cycle assessment of products. **Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 2, p. 81–91, jan. 1993.

GUINÉE, J. B.; UDO DE HAES, H. A.; HUPPES, G. Quantitative life cycle assessment of

- products. 1: Goal definition and inventory. **Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 1, p. 3–13, 1993.
- HAPUWATTE, B. et al. Total Life Cycle Sustainability Analysis of Additively Manufactured Products. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 376–381, 2016.
- HUANG, R. et al. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 1559–1570, nov. 2016.
- IBRAHIM, M. et al. Sustainable Natural Bio Composite for FDM Feedstocks. **Applied Mechanics and Materials**, v. 607, p. 65–69, 2014.
- ISO, B. S. ASTM 52900: 2015. **Additive manufacturing—general principles—terminology**. London: **BSI Standards Limited**, 2016.
- JACKSON, M. A. et al. A Comparison of Energy Consumption in Wire-based and Powder-based Additive-subtractive Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 5, p. 989–1005, 2016.
- KAI, D. A. et al. Measure additive manufacturing for sustainable manufacturing. **Advances in Transdisciplinary Engineering**, v. 4, p. 186–195, 2016.
- KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: Case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 242–251, 2012a.
- KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 242–251, 2 fev. 2012b.
- KELLENS, K. et al. Environmental impact modeling of selective laser sintering processes. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 6, p. 459–470, 2014.
- KIANIAN, B.; LARSSON, T. C. **Additive Manufacturing Technology Potential: A Cleaner Manufacturing Alternative**. Volume 4: 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems. **Anais...ASME**, 2 ago. 2015 Disponível em:  
<<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/DETC2015-46075>>
- KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. **Keele, UK, Keele University**, v. 33, n. TR/SE-0401, p. 28, 2004.
- KREIGER, M. A. et al. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 90–96, 2014.
- 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, 2 dez. 2013.

- LAN, H. Web-based rapid prototyping and manufacturing systems: A review. **Computers in Industry**, v. 60, n. 9, p. 643–656, 2009.
- LE BOURHIS, F. et al. Predictive Model for Environmental Assessment in Additive Manufacturing Process. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 26–31, 2014.
- LEIGH, D. K. **A comparison of polyamide 11 mechanical properties between laser sintering and traditional molding**. [s.l: s.n.].
- LIU, X.; BERTILSSON, H. Recycling of ABS and ABS/PC blends. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 74, n. 3, p. 510–515, 1999.
- LIU, Z. et al. Energy Consumption and Saving Analysis for Laser Engineered Net Shaping of Metal Powders. **Energies**, v. 9, n. 10, p. 763, 2016.
- LUO, Y.; LEU, M. C.; JI, Z. Assessment of environmental performance of rapid prototyping and rapid tooling processes. **Solid Freeform Fabrication Symposium**, p. 783–792, 1999.
- MALSHE, H. et al. **Profile of Sustainability in Additive Manufacturing and Environmental Assessment of a Novel Stereolithography Process**. Volume 2: Materials; Biomanufacturing; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing. **Anais...ASME**, 8 jun. 2015Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/MSEC2015-9371>>
- 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, p. 419–428, 2014.
- MARTINHO, G. et al. Composition of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) by direct sampling. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1213–1217, 2012.
- MENDES CAMPOLINA, J. et al. A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 12, p. 1957–1968, 13 dez. 2017.
- METEYER, S. et al. Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 19–25, 2014.
- MIANEHROW, H.; ABBASIAN, A. Energy monitoring of plastic injection molding process running with hydraulic injection molding machines. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 804–810, 2017.
- 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.
- NAGARAJAN, H. P. N. et al. 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.
- NESS, B. et al. Categorising tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, v. 60, n. 3, p. 498–508, 2007.
- NYAMEKYE, P. et al. Overview of Sustainability Studies of CNC Machining and LAM of

Stainless Steel. **Physics Procedia**, v. 78, n. August, p. 367–376, 2015.

PARIS, H. et al. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1, p. 29–32, 2016.

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

RAMLI, F. R. et al. Integrated recycle system concept for low cost 3D-printer sustainability. **Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2015**, n. March, p. 77–78, 2015.

SANTOS, A. L. et al. **A Decision Tool for Green Manufacturing While Utilizing Additive Process**. Volume 4: Advanced Manufacturing Processes; Biomedical Engineering; Multiscale Mechanics of Biological Tissues; Sciences, Engineering and Education; Multiphysics; Emerging Technologies for Inspection. **Anais...ASME**, 2 jul. 2012Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/ESDA2012-82764>>

SENYANA, L.; CORMIER, D. An environmental impact comparison of distributed and centralized manufacturing scenarios. **Advanced Materials Research**, v. 875–877, p. 1449–1453, 2014.

SILVA, D. et al. **How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto**, 2017.

SPECK, R. et al. Life Cycle Assessment Software: Selection Can Impact Results. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 1, p. 18–28, 2016.

SREENIVASAN, R.; GOEL, A.; BOURELL, D. L. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. **Physics Procedia**, v. 5, n. PART 1, p. 81–90, 2010.

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.

TARANTILI, P. A.; MITSAKAKI, A. N.; PETOUSSI, M. A. Processing and properties of engineering plastics recycled from waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 3, p. 405–410, 2010.

ULLAH, A. M. M. S. et al. Sustainability analysis of rapid prototyping: material/resource and process perspectives. **International Journal of Sustainable Manufacturing**, v. 3, n. 1, p. 20, 2013.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 318–330, 2003.

VINOD, A. R. et al. A novel technique for reducing lead-time and energy consumption in fabrication of Inconel-625 parts by laser-based metal deposition process. **Rapid Prototyping Journal**, v. 22, n. 2, p. 269–280, 21 mar. 2016.

WOHLERS, T. T. et al. **Wohlers Report 2016: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report**. [s.l.] Wohlers Associates, 2016.

WOHLERS, T. T. et al. **Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report: Chapters titles: The Middle East, and other countries**. 22. ed. [s.l.] Wohlers Associates, Inc., 2017.

WOHLERS, T. T.; ASSOCIATES, W.; CAFFREY, T. **Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**. [s.l.] Wohlers Associates, 2014.

XU, X. et al. Energy consumption model of Binder-jetting additive manufacturing processes. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 23, p. 7005–7015, 2015.

YOON, H. S. et al. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology**, v. 1, n. 3, p. 261–279, 2014.

## APÊNDICE A

Tabela 12 - Revisão dos artigos que avaliaram a performance ambiental da MA

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(BAECHLER; DEVUONO; PEARCE, 2013)	<i>Material Extrusion</i>	HDPE	Desenvolver, testar e analisar (Qualidade, Consumo de energia e Tempo) a utilização de filamentos reciclados em impressora <i>RepRap</i> .	Consumo de matéria prima. Consumo de energia <i>Embodied Energy</i>	
(BALOGUN; OLADAPO, 2016)	<i>Material Extrusion</i>	ABS	Improve the direct electrical energy model of FDM strategy with a view to develop mathematical model or framework for a 3D printing process.	Consumo de energia.	
(BARROS; ZWOLINSKI, 2016)	<i>Material Extrusion</i>	PLA	Comparar MA e MC (moldagem por injeção) através de ACV e analisar a influência do perfil do usuário nos resultados.	Tabela 5	Tabela 5
(BAUMERS et al., 2011)	<i>Powder Bed Fusion</i>	PA 12	Comparar o Consumo de energia de dois modelos de impressora (Power Bed Fusion), dividindo o Consumo de energia entre diversas etapas do processo de impressão (Aquecimento, impressão e resfriamento).	Consumo de energia	
(BAUMERS et al., 2013)	<i>Powder Bed Fusion</i>	-	Desenvolver uma ferramenta que estime os fluxos de energia do processo de MA.	Consumo de energia	
(BOURHIS et al., 2013)	<i>Powder Bed Fusion</i>	Aço	Apresentar uma metodologia baseada na ACV para avaliar os impactos ambientais da MA, em particular dos processos Powder Bed Fusion.	Consumo de matéria prima Consumo de energia.	

Fonte: Autor

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(BURKHART; AURICH, 2015)	<i>Powder Bed Fusion</i>	Aço	<p>Ser um guia de como as empresas podem avaliar a redução dos impactos ambientais causados por seus produtos através de componentes obtidos via MA, analisando como exemplo o ciclo de vida de veículo comerciais, através de AICV.</p> <p>Analisar a MA em diferentes aspectos, comparando com a manufatura tradicional e detalhar um estudo de caso que compara o Consumo de energia da MA (SLS) e da manufatura convencional (Moldagem por injeção).</p>	Transporte.	
(CHEN et al., 2015)	<i>Powder Bed Fusion</i>		<p>Descrever diversos tipos de produtos e indústrias que podem, através da utilização da MA, melhorar a sustentabilidade de seus produtos.</p>	Consumo de energia. <i>Embodied Energy</i>	
(DESPEISSE; FORD, 2015)			<p>Apresentar uma nova estratégia para o “caminho” de deposição de processos AM de filamentos metálicos de forma a reduzir a quantidade de matéria prima utilizada (buy-to-fly ratio)</p>	Consumo de matéria prima	
(DING et al., 2016)	<i>Wire and Arc Additive manufacturing (WAAM)</i>		<p>Revisar a literatura sobre a avaliação de impactos ambientais da MA afim de identificar oportunidades para futuras pesquisas</p>	Consumo de matéria prima Consumo de energia	
(DRIZO; PEGNA, 2006)	<i>Vat Photopolymerisation</i>				
(FALUDI et al., 2015b)	<i>Material Extrusion Material Jetting</i>	ABS	<p>Comparar os impactos ambientais de 2 tipos distintos de MA com a manufatura convencional (CNC) através de uma ACV.</p>	Tabela 5	Tabela 5

Fonte: Autor

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(GEBLER; SCHOOT UITERKAMP; VISSER, 2014)			Projetar os aspectos e impactos causados pela utilização da MA até o ano de 2025	Consumo de energia	Emissão de CO <sub>2</sub> Social
(GRIFFITHS et al., 2016)	<i>Material Extrusion</i>	PLA	Otimizar o processo de MA de forma a comparar e relacionar o peso da peça construída, a quantidade de material descartado, o Consumo de energia e o tempo de produção	Consumo de energia Consumo de matéria prima Geração de Resíduos	
(HAPUWATTE et al., 2016)			Comparar a manufatura convencional com a MA, de forma holística, considerando todo ciclo de vida, através do <i>Product Sustainability Index</i> (ProdSI).		Econômico Ambiental Social
(HUANG et al., 2016)	<i>Powder Bed Fusion Direct Energy Deposition</i>	Titânio Alumínio	Analisar, através de uma AICV, as diferenças entre a utilização da manufatura convencional e aditiva na fabricação de peças de aeronaves.	Consumo de matéria prima Consumo de energia	
(IBRAHIM et al., 2014)	<i>Material Extrusion</i>	PLA	Investigar a utilização de PLA biodegradável na MA		
(JACKSON et al., 2016)	<i>Direct Energy Deposition Powder Bed Fusion</i>	Aço	Comparar o Consumo de energia de processos MA <i>wired-based</i> e <i>Powder-based</i>	Consumo de energia	

Fonte: Autor

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(KAI et al., 2016)	<i>Material Extrusion</i> <i>Vat Photopolymerisation</i> <i>Material Jetting</i> <i>Sheet Lamination</i> <i>Powder Bed Fusion</i> <i>Binder Jetting</i>		Investigar as métricas aplicadas para identificar vantagens e desvantagens da MA.	Consumo de Água Consumo de matéria prima Consumo de energia Geração de Resíduos	Potencial de Aquecimento Global (PAG) Potencial de acidificação
(KELLENS et al., 2014)	<i>Powder Bed Fusion</i>	PA 12	Efetuar uma AICV baseado na metodologia CO2PE! para estimar <i>environmental footprint</i> do processo SLS	Consumo de energia Consumo de matéria prima Emissões	Diversos
(KIANIAN; LARSSON, 2015)	<i>Vat Photopolymerisation</i>	PS	Realizar uma AICV comparando a MA (SLS) com a convencional (Injeção)	Consumo de matéria prima Consumo de energia	
(KREIGER et al., 2014)	<i>Material Extrusion</i>	HDPE	Realizar uma ACV de modo a verificar o melhor cenário para reciclagem de HDPE para ser usado como matéria prima da MA.	Tabela 5	Tabela 5
(KREIGER; PEARCE, 2013)	<i>Material Extrusion</i>	ABS PLA	Realizar uma AICV comparativa entre o processo de MA e manufatura convencional (moldagem por injeção)	Tabela 5	Tabela 5
(LE BOURHIS et al., 2014)	<i>Direct Energy Deposition</i>	Metal	Propor uma metodologia para avaliar o Consumo de energia, matéria prima e fluidos nas diversas etapas da MA <i>Direct Energy Deposition</i> (Atomização e impressão)	Consumo de energia Consumo de matéria prima Consumo de Água	

Fonte: Autor

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(LIU et al., 2016)	<i>Direct Energy Deposition</i>	Liga Metálica	Avaliar o Consumo de energia do processo <i>Direct Energy Deposition</i> variando a potência do laser, velocidade de escaneamento e taxa de deposição de matéria prima.	Consumo de energia	
(LUO; LEU; JI, 1999)	<i>Vat Photopolymerisation</i>	Resina Epoxy	Apresentar uma metodologia para avaliação de performance ambiental da MA (SLA) considerando as diversas etapas do processo .	Consumo de matéria prima Consumo de energia Geração de Resíduos	Impacto total
(MALSHE et al., 2015)	<i>Vat Photopolymerisation</i>	Resina Epoxy	Realizar uma ACV para analisar a performance ambiental de um novo tipo de SLA (Fast MIP-SL)	Tabela 5	Tabela 5
(MANI; LYONS; GUPTA, 2014)			Propor uma metodologia para caracterizar a sustentabilidade dos processos de MA.		
(METEYER et al., 2014)	<i>Binder Jetting</i>		Realizar uma AICV para servir de base para uma ACV de um processo de MA.	Consumo de energia Consumo de matéria prima	
(MOGNOL; LEPICART; PERRY, 2006)	<i>Material Jetting</i> <i>Material Extrusion</i> <i>Powder Bed Fusion</i>		Discutir o Consumo de energia da MA, analisando 3 diferentes tecnologias de MA, comparando o Consumo de energia a partir da alteração dos parâmetros, visando a redução do Consumo de energia.	Consumo de energia	
(NAGARAJAN et al., 2016)	<i>Vat Photopolymerisation</i>		Conduzir uma avaliação de impacto ambiental de um equipamento SLA (Fast MIP-SL) através de AICV.	Tabela 5	Tabela 5

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(NYAMEKYE et al., 2015)	<i>Powder Bed Fusion</i>		Determinar os ganhos em sustentabilidade na cadeia de suprimentos com a utilização da MA e oferecer uma metodologia para a condução de uma AICV comparando AM e CNC.	Consumo de matéria prima Consumo de energia Geração de Resíduos	
(PARIS et al., 2016)	<i>Direct Energy Deposition</i>	Titânio	Realizar uma ACV como critério de decisão para escolha de processo de manufatura (MA x Fresa).	Tabela 5	Tabela 5
(PENG, 2016)			Propor modelos para estimar e otimizar o consumo de energia da MA baseando-se na divisão deste consumo entre primário (mudar a fase da matéria prima) e secundária (impressão em si).		
(RAMLI et al., 2015)	<i>Material Extrusion</i>	ABS	Desenvolver um sistema integrado de reciclagem de matéria prima na própria impressora 3D.	Consumo de matéria prima	
(SANTOS et al., 2012)	<i>Material Extrusion</i>	ABS	Realizar um estudo de caso, realizando uma ACV baseado em uma ferramenta computacional própria.	Consumo de matéria prima Consumo de energia Geração de Resíduos Transporte	Impacto ambiental
(SENYANA; CORMIER, 2014)	<i>Direct Energy Deposition</i>	Titânio	Comparar o impacto ambiental da MA em relação a convencional (forja).	Consumo de matéria prima Consumo de energia Transporte	<i>Eco-Points</i>

Fonte: Autor

Tabela 12 - Continuação

<b>Autoria</b>	<b>Tecnologia de MA</b>	<b>Matéria Prima</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Aspectos Analisados</b>	<b>Impactos Analisados</b>
(SREENIVASAN; GOEL; BOURELL, 2010)	<i>Powder Bed Fusion</i>	PA 12	Realizar uma análise do <i>Consumo de energia</i> em diversos componente do processo SLS de forma a comparar e discutir com outros processos	Consumo de energia Consumo de matéria prima	<i>Total Energy Indicator</i>
(TANG; MAK; ZHAO, 2016)	<i>Binder Jetting</i>		Propor um <i>framework</i> que possa integrar um estágio de design na ACV para minimizar os impactos ambientais gerados pela MA	Consumo de matéria prima Consumo de energia Geração de Resíduos	Mudanças climática Toxicidade humana
(ULLAH et al., 2013)	<i>Vat Photopolymerisation</i>		Desenvolver um indicador de sustentabilidade para a MA considerando o volume das peças, pegada de carbono, esgotamento de recursos da produção primária, consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> .	Consumo de energia	Emissão de CO <sub>2</sub>
(VINOD et al., 2016)	<i>Direct Energy Deposition</i>	Liga Metálica	Reduzir o tempo de ciclo de consumo de energia do processo <i>Direct Energy Deposition</i> e investigar os efeitos dos parâmetros do processo na microestrutura, densidade, rugosidade da superfície, precisão dimensional e microdureza.	Consumo de energia	
(XU et al., 2015)	<i>Binder Jetting</i>		Criar um modelo para analisar consumo de energia do processo <i>Binder Jetting</i> .	Consumo de energia	
(YOON et al., 2014)	<i>Material Extrusion</i> <i>Powder Bed Fusion</i>		Comparar a manufatura convencional (subtrativa) e aditiva em termos de Consumo de energia	Consumo de energia	

Fonte: Autor

