

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI**

**THIAGO LOURENÇO MEIRA DE ALBUQUERQUE**

**ANÁLISE DOS CUSTOS E EXTERNALIDADES NO CONTEXTO DA ECONOMIA  
CIRCULAR**

São Bernardo do Campo

2018

THIAGO LOURENÇO MEIRA DE ALBUQUERQUE

**ANÁLISE DOS CUSTOS E EXTERNALIDADES NO CONTEXTO DA ECONOMIA  
CIRCULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Orientado pelo Prof. Dra. Cláudia Aparecida de Mattos.

São Bernardo do Campo

2018

Meira de Albuquerque, Thiago Lourenço.

ANÁLISE DOS CUSTOS E EXTERNALIDADES NO CONTEXTO  
DA ECONOMIA CIRCULAR / Thiago Lourenço Meira de Albuquerque.  
São Bernardo do Campo, 2018.

163 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Cláudia Aparecida de Mattos..

1. Economia Circular. 2. Modelo de Negócio. 3. Custo de Ciclo de  
Vida. 4. Benefícios. 5. Externalidades.. I. Aparecida de Mattos.,  
Cláudia , orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).



**APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO**  
**ATA DA BANCA EXAMINADORA**  
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

**Aluno:** Thiago Lourenço Meira de Albuquerque

**Matrícula:** 216322-8

**Título do Trabalho:** Análise dos custos e externalidades no contexto da economia circular.

**Área de Concentração:** Produção

**Orientador:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Claudia Aparecida de Mattos

**Data da realização da defesa:** 09/11/2018

**ORIGINAL ASSINADA**

**Avaliação da Banca Examinadora:**

---

---

---

---

---

---

São Bernardo do Campo,        /        /        .

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Claudia Aparecida de Mattos

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kumiko Oshio Kissimoto

Ass.: \_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Roberta de Castro Souza Pião

Ass.: \_\_\_\_\_

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

**VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO**

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE  
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA  
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Primeiramente, dedico e agradeço a realização desse trabalho a DEUS, ao Sagrado Coração de Jesus e a Nossa Senhora Aparecida. Dedico e agradeço a realização desse trabalho à minha família: (i) pais e irmão (João, Cecília e Josué); (ii) minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida de Mattos; e a (iii) FEI/CAPES, que me apoiaram e me incentivaram durante todo o período do curso e durante a realização do trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a (i) DEUS pela realização do curso e do trabalho. Muitas pessoas me apoiaram na realização desse trabalho, especialmente (ii) minha família: meu pai (João Lourenço), minha mãe (Cecília Meira) e meu irmão (Josué Lourenço); (iii) minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Mattos, que me apoiou, me orientou em cada passo do trabalho; desde o início do curso, através do desenvolvimento do tema, seja nas disciplinas, participação de congresso e me direcionando com sua vasta experiência profissional e acadêmica, com a finalidade de agregar conhecimento a essa etapa em minha vida; realmente, meu eterno obrigado pelo seu apoio; a (iv) Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gabriela Scur Almudi, que, juntamente com a minha orientadora, me direcionou, colaborou e me apoiou durante as fases do curso, agregando com seu conhecimento e sua experiência profissional, para que eu pudesse realizar esse trabalho. Referente ao desenvolvimento do trabalho, muitas pessoas agregaram e ajudaram, como o (v) Sr. Raul Bosco Jr., pelo seu excelente apoio e hospitalidade; (vi) Paloma Cavalcanti e (vii) Débora Galvão, pelo apoio no desenvolvimento; os engenheiros (viii) Fernando Wolmer e (ix) Flávio Ribeiro da Cetesb, pelo suporte e direcionamento. Gostaria também de agradecer aos professores que me ensinaram e me guiaram durante o desenvolvimento das disciplinas de todo curso: (x) Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote, (xi) Prof. Dr. Wilson de Castro Hilsdorf, (xii) Prof. Dr. João Chang Júnior, (xiii) Prof. Dr. Mauro Sampaio, (xiv) Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Kumiko Oshio Kissimoto e (xv) Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Roberta de Castro Souza. Uma especial e eterna gratidão à FEI e à Capes, que me apoiaram e me deram suporte durante o desenvolvimento desse trabalho e durante a realização do curso. Gostaria de agradecer aos meus familiares pelo eterno apoio durante todo meu percurso, e expressar meu especial agradecimento a minha avó, Teresinha Pranches de Meira. Aos meus amigos, que me apoiaram no desenvolvimento do curso: Fernando Wongtschowski, muitíssimo obrigado pelo apoio para a realização desse curso; à Gabriela Spedo e seu esposo, Thiago, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho; e àqueles que me apoiaram nesse período (por ordem alfabética), André Seixas Rodrigues, André Santi, Deivid Nogueira, Diogo Meira, Eduardo Seixas Rodrigues, Emmanuel Pedro, Glauco Silva, Ivo Tsumura, Lucas Meira, Lucio Marcato, Marcos Santis, Rafael Paris, Rafael Pereira da Silva, Rafael Soares Campos, Vinícius Marcel; aos meus colegas de classe; Felipe, Marcos Vido, Alexandre, Leandro, Marcelino, Jobel, Raul, Márcia, Rodrigo e Vitor, muito obrigado! Agradeço também ao Rodrigo, à Adriana (Secretaria) e à Márcia (Biblioteca) da FEI pelo apoio e ajuda! Muito obrigado, e desejo a todos muito sucesso!

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”.

“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo. Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

## RESUMO

O conceito de Economia Circular (EC) ganha cada vez mais destaque no meio acadêmico, corporativo e governo, porém a sua real disseminação ainda é limitada. Observa-se uma carência de estudos que abordem estratégias e práticas norteadas pelos princípios de desenvolvimento de processos e produtos para um uso mais racional dos recursos naturais, reduzindo o consumo ou promovendo sua recuperação. A transição das empresas de uma economia linear para uma Economia Circular (EC) traz uma série de desafios, sendo essencial compreender o impacto das mudanças em seus modelos de negócio sob a perspectiva da gestão de negócios. Estudos apontam lacunas em relação aos métodos de avaliação dos custos que abordem o problema como um todo e não apenas como uma soma de partes para selecionar a opção mais adequada e confiável no contexto da EC. Assim, um dos aspectos que é importante ser analisado está relacionado aos custos, benefícios e às externalidades e respectivas ferramentas que permitam capturar as variáveis envolvidas em todo o ciclo de vida de um produto ou material. Neste contexto, o objetivo principal da pesquisa consiste em analisar os custos, benefícios e externalidades associados a um produto/material através de ferramentas de apoio à decisão no contexto da economia circular, considerando o seu valor agregado para a sociedade e meio ambiente. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi feita uma análise dos custos combinada com as externalidades, através do conceito LCC (Life Cycle Costing), em modelos de negócio circular em diferentes atuações: (1) embalagens alimentícias; (2) eletrônicos; e (3) linha branca. Os custos relacionados às embalagens alimentícias apresentaram viabilidades; aqueles referentes aos eletrônicos e à linha branca não apresentaram atratividade, porém se constatou necessária sua implementação devido à PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos). O estudo desenvolvido contribuiu para a evolução dos conceitos e métodos ajudando a integrar e otimizar as considerações econômicas, para oferecer cenários mais sustentáveis no futuro.

**Palavras-chave:** Economia Circular, Modelo de Negócio, Custo de Ciclo de Vida, Benefícios, Externalidades.

## ABSTRACT

The concept of the Circular Economy (EC) is getting more relevance in academics, corporations and government area, but its real dissemination is still limited. There is a lack of studies, which address its strategies and its practices guided by the principles of product and process development to a more rational usage of natural resources, consumption reduction or promoting their recovery. This gap affects the knowledge advancement on the industry subject and its widespread adoption. In this context, the transition of companies from a linear to a Circular Economy (CE) brings a series of challenges, and it is essential to understand the impact of changes in their business models from a management perspective. Researches drives gaps related costs evaluation methods, which address the entire problem and not only as a sum of parts in order to select the most suitable or reliable option in EC Context. Thus, one important aspects to be highlight and analyzed is the costs evaluations, benefits and externalities and its respective tools, which allow capturing the whole variables involved throughout the product life cycle. In this context, the main objective of the research is to analyze the benefit and internal and external costs associated with a product through support decision tools in the context of the circular economy, considering its value added for society and to the environment. During the research development, it was developed the analysis of three circular business models in different activities: (1) Food Package, (2) Electronics and (3) White-Good Appliances. About the costs related by food package case, the costs presented viability and for the costs related by Electronics and White-Good Line cases, they did not presented attractively, but even that, this studies raised the need for its implementation due the PNRS or ERP (Waste Management Policy). The study seeks to contribute to the evolution of concepts and methods in order to integrate and optimize the economic, social and environmental integration considerations, providing more sustainable scenarios in the future.

**Keywords:** Circular Economy, Business Model, Life Cycle Costing, Benefits, Externalities.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1- Síntese das definições sobre Economia Circular .....	14
Quadro 2 - Princípios dos 3Rs da EC .....	15
Figura 1 – Níveis de implementação da Economia Circular .....	16
Figura 2 – Framework para aplicação da técnica do PSILA .....	29
Figura 3 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para o monitor LCD ou FPD. ....	30
Figura 4 - Estrutura de informação do produto .....	30
Figura 5 - Mapa e Submapa (4) do Ciclo de Vida Integrado do Monitor LCD .....	31
Quadro 3 – Perfil dos entrevistados para cada contextualização.....	40
Figura 6 – Arquétipos Sustentáveis de Bocken .....	41
Figura 7- Etapas do Protocolo de Pesquisa de Campo .....	42
Figura 8 - Desenvolvimento do LCC (Apoiado pela Ferramenta PSILA) .....	43
Figura 9 - Desenvolvimento do ELCC .....	44
Figura 10 – Modelo de Negócio Circular da Lata de Alumínio de Alimentos .....	48
Figura 11 – Processo de reciclagem e laminação de alumínio .....	49
Figura 12 - Etapa Principais de Produção da embalagem alimentícia (“Mainstream Production Phase”) .....	50
Figura 13 - Análise do resultado de produção para cada peça da lata.....	51
Figura 14 - Sistema Conceitual de Ciclo Fechado para o Alimento Enlatado em Alumínio .....	52
Figura 15 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para a lata de alumínio alimentícia. ....	53
Figura 16 – Estruturação Completa da Informação do Produto para a Lata de Alimento Processado .....	54
Figura 17 - Mapa do Ciclo de Vida Integrado da Lata.....	54
Figura 18 - Análise do Ciclo de Vida da Lata - Emissões de CO2 .....	65
Figura 19 – Pilares Estratégicos da Empresa de Gestão de Resíduos .....	69
Figura 20 – Benefícios ambientais e sociais.....	71
Figura 21 – Cadeia de Fornecimento Ciclo Fechado do Plástico para Equipamentos Eletrônicos .....	72

Figura 22 – Processo de gestão de resíduo de equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico.....	74
Figura 23 – Processo de fabricação de peças plásticas para equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico.....	75
Figura 24 – Processo de gestão de resíduos dos componentes de cartucho de tinta .....	75
Figura 25 - Fase de Produção Principal da Impressora. ....	76
Figura 26 - Sistema Conceitual de Ciclo Fechado para a Impressora.....	77
Figura 27 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para a Impressora Jato de Tinta.....	78
Figura 28 - Completa estrutura de informação do produto para a impressora jato de tinta .....	80
Figura 29 - Mapa do ciclo de vida integrado da impressora jato de tinta.....	80
Figura 30 - Análise do ciclo de vida da impressora - Emissões de CO2.....	89
Figura 31 – Quantidades de materiais de refrigeradores reciclados em 2015 e 2016 .....	93
Figura 32 – Análise LCA de emissões de GEE.....	94
Figura 33 – Cadeia de fornecimento ciclo fechado do compressor para refrigeradores .....	95
Figura 34 – Processo geral de desmontagem do refrigerador .....	98
Figura 35 – Processo geral de destinação dos materiais da porta e cabine do refrigerador .....	98
Figura 36 – Sistema de refrigeração do eletrodoméstico .....	100
Figura 37 - Sistema de desmontagem da unidade de refrigeração .....	101
Figura 38 – Representação do processo produtivo do compressor hermético do refrigerador .....	103
Figura 39 - Sistema conceitual de ciclo fechado para o compressor hermético.....	103
Figura 40 – Sistema de produção em ciclo fechado integrado ao ciclo de vida.....	104
Figura 41 - Completa estrutura de informação do produto agrupado em materiais metálicos para o compressor hermético.....	107
Figura 42- Mapa do ciclo de vida integrado do compressor hermético .....	108
Figura 43 - Completa estrutura de informação do produto completa para o compressor hermético .....	108
Figura 44 - Análise do ciclo de vida do compressor - emissões de CO2 .....	118
Figura 45 - Representações dos ciclos técnicos e biológicos do Cradle to Cradle.....	149
Figura 46 - Diagrama de Circularidade .....	151
Figura 47 - Exemplo da metodologia de cálculo da Circularidade do Material.....	152
Figura 48 - Análise do Ciclo de Vida - (LCA).....	153
Quadro 4 - Normas ISO sobre o LCA .....	154

Figura 49 - Fases de Análise do LCA - ISO 14040 – ISO 14044 (2006).....	155
Figura 50 - Ilustração de uma análise de inventário do ciclo de vida de um produto conforme exemplificado pela ISO 14040 (2006) .....	156
Figura 51 - Classificação e Caracterização de Impacto do Aço .....	156
Figura 52 - Avaliação dos Potenciais de Impacto .....	157
Figura 53 – Modelo Teórico do SLCA.....	158
Quadro 5 - Objetivos da PNRS que são atendidos com o programa de reciclagem. ....	163

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de gases com efeito de estufa expressas em equivalente CO <sub>2</sub> ou CO <sub>2</sub> e (Alumínio) .....	46
Tabela 2 - Taxa de Geração de Sucata no Processo Produtivo .....	51
Tabela 3 - Peso de peça (i) por lata (j).....	59
Tabela 4 - Produção OV i (t) e RV i (t-1) para uma PV i (t) (produção) de 1.000 latas – Aplicação das fórmulas 23, 24 e 25. ....	59
Tabela 5 - Custo ou Preço dos Materiais Metálicos (k). ....	60
Tabela 6 - Custo de Aquisição de Material – CV procurement i(t) – Fórmula 28 .....	60
Tabela 7 - Custo de Aquisição de Material – CV sucata i(t-1) – Fórmula 30 & NPV Sucata – Fórmula 29 .....	61
Tabela 8 - Custo Variável do Material – CV lata (j(t)) – Fórmula 27.....	61
Tabela 9 - Custo total da lata (j) .....	62
Tabela 10 - Diferença de peso de uma embalagem de alimento em Alumínio e Aço.....	63
Tabela 11 - Economia de Peso no Transporte utilizando o material alumínio.....	63
Tabela 12 - Economia de Combustível .....	63
Tabela 13 - Cálculo da redução de Emissão de CO <sub>2</sub> conforme redução de carga do veículo.....	65
Tabela 14 - Análise de emissões de CO <sub>2</sub> durante o ciclo de vida da lata .....	66
Tabela 15 - Cálculo do ELCC para 1000 Latas.....	67
Tabela 16 – Taxa média de conteúdo reciclado, mix de composição de peças e geração de sucata.....	79
Tabela 17– Preços estimados dos plásticos para injeção de peças eletroeletrônicas.....	83
Tabela 18 - Peso de peça plástica por material (i/k) por impressora (j) .....	85
Tabela 19 - Produção OV i (t) e RV i (t-1) para uma PV i (t) (produção) de 1 impressora – Aplicação das fórmulas 23, 24 e 25. ....	85
Tabela 20 - Custo de aquisição de material – CV procurement i(t) – Fórmula 28.....	86
Tabela 21 - Custo de aquisição de material – CV sucata i(t-1) – Fórmula 30 & NPV Sucata – Fórmula 29 .....	86
Tabela 22 - Custo variável do material – CV plástico (j(t)) – Fórmula 27 .....	86
Tabela 23 - Custo total da impressora (j) - \$ (em Reais).....	87
Tabela 24 – Dados de Emissão de CO <sub>2</sub> .....	88

Tabela 25 - Análise de emissões de CO <sub>2</sub> durante o ciclo de vida da impressora .....	89
Tabela 26 - Cálculo do ELCC para 1 impressora.....	90
Tabela 27 – Peso das peças metálicas por material do compressor hermético.....	104
Tabela 28 – Taxa de geração de sucata por peças metálicas do compressor hermético.....	105
Tabela 29 – Conteúdo reciclado média do compressor hermético .....	105
Tabela 30 - Taxa de geração de sucata total (RV $i(t-1)$ ) .....	106
Tabela 31 - Taxa de geração de sucata total RV (%) .....	106
Tabela 32 – Preços médios dos metais para fundição e conformação de peças mecânicas ...	112
Tabela 33 - Peso de peça metálica por material (i/k) por compressor (j).....	113
Tabela 34 - Produção OV $i(t)$ e RV $i(t-1)$ para uma PV $i(t)$ (produção) de 1 compressor – aplicação das fórmulas 23, 24 e 25.....	113
Tabela 35 - Custo de aquisição de material – CV procurement $i(t)$ – Fórmula 28.....	114
Tabela 36 - Custo de aquisição de material – CV sucata $i(t-1)$ – Fórmula 30 & NPV sucata – Fórmula 29 .....	115
Tabela 37 - Custo variável do material – CV Metal (j(t)) – Fórmula 27.....	116
Tabela 38 - Custo total do compressor hermético (j) - R\$ (em reais) .....	117
Tabela 39 – Dados de Emissão de CO <sub>2</sub> .....	118
Tabela 40 - Análise de emissões de CO <sub>2</sub> durante o ciclo de vida do compressor .....	119
Tabela 41 - Cálculo do ELCC para 1 compressor .....	120
Tabela 42 – Resultados ELCC para embalagem alimentícia .....	121
Tabela 43 – Resultados ELCC para eletrônicos (impressora) – em R\$ .....	123
Tabela 44 – Resultados ELCC para linha branca (compressores herméticos) – em R\$ .....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3R	Reutilização, Reparação e Remanufatura
AA	Aluminum Association
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
AP	Acidification (Acidificação)
BOM	Bill of Material (Lista de Materiais)
C2C	Cradle to Cradle (Berço à Berço)
CL	Closed Loop (Ciclo Fechado)
CM	Carbon Management (Gerenciamento de Carbono)
CP	Cleanning Production (Produção Limpa)
CRU	Empresa Privada de Inteligência de Negócios na área de Metais
CSR	Responsabilidade Social Corporativa
DBOM	Disassembly Bill of Material (Desmontagem da Lista de Materiais)
DFE	Design Verde para o Meio Ambiente
EC	Economia Circular
EEE	Electrical and Electronic Equipments (Equipamentos Elétricos e Eletrônicos)
ELCC	Environment Life Cycle Cost
EoL	End of Life (Final de Vida)
EPR	Extend Producer Responsibility (Responsabilidade Extendida do Fabricante)
ETP	Ecotoxicity Potential (Potencial Ecotóxico)
EU	European Union (União Européia)
FPD	Flat Panel Display (Display de Painel Plano)
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
HTP	Ozone Depletion (Depleção de Ozônio)
IOCI	Índice Carajós de Minério de Ferro
LCC	Life Cycle Cost (Custo de Ciclo de Vida)

LCCA Life Cycle Cost Analysis (Análise do Custo de Ciclo de Vida)

LCD Liquid Crystal Display (Display de Cristal Líquido)

LCSA Avaliação do Ciclo de Vida Sustentável

LCSA Life Cycle Sustainability Assesment

LME London Metal Exchange

MCI Índice de Circularidade do Material

MH Material Health (Saúde do Material)

MP Mainstream Production (Fase de Produção Principal)

MR Material Reuse

MRI Midwest Research Institute (Instituto de Pesquisa do Centro-Oeste)

MWP Middle West Premium

NP Abiotic Depletion (Depleção Abiótica)

NPV Net Present Value (Valor Presente Líquido)

ODP Ozone Depletion Potential (Potencial de Depleção de Ozonio)

OF Outgoing Fraction (Perdas Fracionadas)

ONU Organizações das Nações Unidas

PCB Placa Eletrônica

PNRS Política Nacional dos Resíduos Sólidos

POCP Photochemical Oxidant Creation (Criação de Oxidante Fotoquímico)

PR Part Ratio (Taxa por Partes)

PSILA Estruturação do Produto baseado na Integração do Ciclo de Vida

RE Renewable Energy (Energia Renovável)

SETAC Society of Environmental Toxicology and Chemistry (Sociedade Ambiental de Toxologia e Química)

SF Social FED (Justiça Social)

SLCA Social Life Cycle Assesment

TIR Taxa Interna de Retorno

WEEE Waste Electrical and Electronic Equipment (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos).

WS Water System (Sistema de Água)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR E SEU NÍVEL DE IMPLEMENTAÇÃO.....	13
2.2 MODELOS DE NEGÓCIO CIRCULAR .....	20
2.3 CONCEITO DO LIFE CYCLE COSTING (LCC) E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS APLICADOS NO CONTEXTO DA EC.....	23
2.3.1 Estrutura de Produto baseado na Análise do Ciclo de Vida Integrado (PSLIA).....	27
2.4 EXTERNALIDADES .....	35
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 PERFIL DOS ENTREVISTADOS .....	39
3.2 CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS MODELOS DE NEGÓCIO .....	41
3.3 PROTOCOLO DE PESQUISA.....	42
<b>4. MODELOS DE NEGÓCIO ANALISADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1 EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS .....	45
4.1.1 Análise do Negócio Circular .....	45
4.1.2 LCC .....	48
4.1.2.1 <i>Gestão de Resíduos (EoL)</i> .....	48
4.1.2.2 <i>Processo Principal de Produção (MP)</i> .....	49
4.1.2.3 <i>Estruturação Completa da Informação do produto e Mapa de Ciclo de Vida do Produto</i> .....	53
4.1.2.4 Custeio da Matéria Prima em Ciclo Fechado e a Integração no Custo Completo do Produto.....	54
4.1.3 ELCC.....	62
4.1.3.1 Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto.....	62
4.1.3.2 Internalização e a união do LCC .....	66

4.2	ELETRÔNICO .....	67
4.2.1	Análise do Modelo de Negócio Circular .....	67
4.2.2	LCC .....	73
4.2.2.1	<i>Gestão de Resíduos (EoL)</i> .....	73
4.2.2.3	<i>Processo Principal de Produção (MP)</i> .....	76
4.2.2.4	<i>Estruturação Completa da informação do produto e Mapa de Ciclo de Vida do Produto</i> .....	79
4.2.2.5	<i>Custeio da Matéria Prima em Ciclo Fechado e a Integração no Custo Completo do Produto.</i> .....	80
4.2.3	ELCC .....	87
4.2.3.1	<i>Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto</i> .....	88
4.2.3.2	<i>Internalização e a união do LCC</i> .....	90
4.3	LINHA BRANCA .....	91
4.3.1	Análise do Modelo de Negócio Circular .....	91
4.3.2	LCC .....	96
4.3.2.1	<i>Operação de Gestão de Resíduos (EoL)</i> .....	96
4.3.2.2	<i>Processo Principal de Produção (MP)</i> .....	102
4.3.2.3	<i>Estruturação Completa da informação do produto, Mapa de Ciclo de Vida do Produto</i> .....	106
4.3.2.4	<i>Custeio da Matéria Prima em Ciclo Fechado e a Integração no Custo Completo do Produto.</i> .....	109
4.3.3	ELCC .....	117
4.3.3.1	<i>Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto</i> .....	117
4.3.3.2	<i>Internalização e a união do LCC</i> .....	119
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	120
4.4.1	Embalagens Alimentícia .....	121
4.4.2.	Eletrônicos (Impressoras) .....	122
4.4.3.	Linha Branca (Compressores Herméticos) .....	124
	<b>CONTRIBUIÇÃO TEÓRICA E PRÁTICA</b> .....	<b>125</b>
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>127</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>128</b>

<b>ANEXO A – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA EMBALAGEM METÁLICA (AÇO &amp; ALUMÍNIO) PARA ALIMENTOS .....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO B – QUESTIONÁRIO (ROTEIRO DE VISITA). .....</b>	<b>142</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>160</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o início da revolução industrial, a economia produtiva foi baseada em uma economia linear (extrair, produzir e descartar) (NESS, 2008). A Economia Circular (EC) é vista como uma alternativa sustentável frente ao modelo da economia linear, principalmente pelo reuso dos materiais em novos produtos (SINGH E ODOÑEZ, 2016; DERVOJEDA ET AL., 2014). No entanto, segundo Gregson et al. (2014), o conceito de economia circular ganha cada vez mais destaque no meio acadêmico, corporativo e governo, apesar de sua disseminação ainda limitada, na prática.

Conforme Zink e Geyer (2017), em termos práticos, a EC consiste em 3 atividades: (i) reuso de produtos (incluindo a reparação e o *refurbishment*); (ii) reuso de componentes (remanufatura); e (iii) reuso de materiais (reciclagem). A EC inclui o *closing material loops*, ou ciclo fechado de materiais, que tem como objetivo o uso mais consciente dos recursos naturais e o reuso e reciclagem de nutrientes biológicos para extrair seu valor máximo com o mínimo gasto (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION 2016; FENG E YAN, 2007; NAUSTDALSLID, 2014; MATHEUS, 2011; SCHEEPENS ET AL., 2015; ZINK E GEYER, 2017).

De acordo com Geng et al. (2014), a EC também pode ser vista como um sistema industrial, ou também chamado de eco industrial, que é intencionalmente reparador ou regenerativo, trazendo benefícios operacionais e estratégicos, além de um potencial de inovação. A implementação deste modelo implica em um projeto abrangente que envolve soluções alternativas, ao longo de todo o ciclo de vida do produto e do processo, bem como a interação com o meio ambiente.

Os modelos de negócio circulares podem gerar benefícios, como redução dos custos e reduções nos impactos ambientais (LINDER E WILLIANDER, 2015), porém são necessárias ferramentas de gestão que auxiliem os gestores nesta análise. Neste contexto, autores como Florindo et al. (2017), Almeida et al. (2017), Niero e Hauschild (2017), Hall (2015) e Bradley, Ryan et al. (2018) discutem lacunas na literatura relacionadas com a necessidade de ferramentas e métodos que possam contribuir para uma melhor gestão na EC.

Florindo et al. (2017) destacaram a importância da adoção de métodos que permitam a integração dos custos de produção com impactos ambientais estabelecidos através do ciclo de vida do produto, a fim de se gerar informação para o processo decisório de uma organização, contribuindo para uma gestão eficaz em termos de combinação na criação de valor ambiental e

valor econômico, porém orienta-se que há necessidade de futuros estudos, que busquem novas ferramentas e métodos para uma avaliação dos custos, benefícios e externalidades, capturando as variáveis envolvidas em todo o ciclo de vida de um produto. Almeida et al. (2017) reforçam esses argumentos, quando afirmam que os tomadores de decisão na indústria necessitam buscar métodos de avaliação que abordem o problema como um todo e não apenas como uma soma de partes, para selecionar a opção mais adequada e confiável. Niero e Hauschild (2017) complementam que, para garantir que as indústrias entreguem suas contribuições para a sociedade na adoção de estratégias de economia circular, há a necessidade de se traduzir limites globais ou regionais de impacto ambiental para um conjunto de requisitos de parâmetros industriais mensuráveis. Hall (2015) cita a importância de se identificar objetivos econômicos, escopos e alocações de custo compatíveis com os parâmetros de sustentabilidade. Bradley et al. e Ryan et al. (2018) discutem a importância do *Life Cycle Costing* (LCC) como conceito norteador para analisar os custos envolvidos em um contexto de EC. Os autores afirmam que no contexto da EC é necessário adotar a abordagem LCC, que servirá como principal modelo de engenharia econômica a conduzir as soluções para a fabricação sustentável e visão de economia circular.

Com base na discussão desses autores, objetivo principal desta pesquisa consiste em analisar o custo do ciclo de vida do produto/material, benefícios e externalidades de uma forma integrada a partir do conceito do *Life Cycle Costing* (LCC). Nessa pesquisa, serão analisados três modelos circulares: (i) embalagem alimentícia; (ii) eletrônico; e (iii) linha branca. Para o modelo de negócio de embalagem alimentícia, será feito um estudo para aplicação dos materiais alumínio e aço (Folha de Flandres); para o eletrônico será realizada uma análise centrada para a impressora jato de tinta; e para a linha branca, serão analisados os compressores herméticos para refrigeradores.

Com a finalidade de se estruturar o objetivo geral para o desenvolvimento deste estudo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (a) caracterização dos modelos de negócios circulares (embalagem alimentícia, eletrônico e linha branca) que serão analisados nesta pesquisa; (b) identificação dos atores da cadeia de fornecimento de cada modelo de negócio estudado; (c) mapeamento dos dados relativos ao custo e benefícios no contexto do ciclo de vida do produto/material; e (d) mapeamento das externalidades para cada modelo analisado.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção de fundamentação teórica há a abordagem dos seguintes tópicos: (i) Conceito de Economia Circular, com o objetivo de se entender a evolução de seu conceito e seu nível de implementação. Em seguida, é demonstrada (ii) a concepção do modelo de negócio circular, pois a transição de um modelo linear para o modelo circular implica em novos modelos de negócios, e, conforme Lewandowski (2016), o conhecimento abrangente na concepção de modelos de negócios circulares estimula e garante a aplicação da economia circular em um nível micro, permitindo entender a sua respectiva gestão. O terceiro tópico refere-se ao (iii) conceito do LCC e seus respectivos métodos aplicados no contexto de um modelo de negócio circular. Completando o tópico referente à fundamentação teórica, foi feita uma discussão sobre externalidades, pois consiste em uma variável a ser integrada ao modelo LCC para a gestão no contexto da EC.

### 2.1. CONCEITOS DE ECONOMIA CIRCULAR E SEU NÍVEL DE IMPLEMENTAÇÃO

As pesquisas sobre sustentabilidade nas operações empresariais evoluíram a partir da perspectiva da empresa focal para além das fronteiras organizacionais justamente para incluir ligações interorganizacionais dentro de cadeias de fornecimento (BOURLAKIS ET AL., 2014; WALKER ET AL., 2014). A EC visa transformar resíduos em recursos e busca trabalhar a ligação entre as atividades de produção e de consumo. Produtos e processos são redesenhados para maximizar o valor dos recursos com a finalidade de dissociar o crescimento econômico e a utilização desses recursos, o que pode ser definido como um sistema econômico com *loops* de retorno de materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2010; LACY AND RUTQVIST, 2015; LOVINS E BRAUNGART, 2014; MENTIK, 2014; WEBSTER, 2015). Complementando a teoria sobre EC, pode-se verificar no Quadro 1 a definição de alguns autores sobre a EC.

Quadro 1- Síntese das definições sobre Economia Circular

Autor	Definição
<b>Yong (2007)</b>	Envolve a reestruturação do fluxo material. Eficiência de utilização de recursos e redução da intensidade das emissões.
<b>Geng and Doberstein (2008)</b>	Realização de um circuito de fluxo fechado de materiais; Atividades com processos de <i>feedback</i> que imitam os ecossistemas naturais através de um processo de “transformação de recursos naturais” em produtos manufaturados → subprodutos de fabricação usados como recursos para outras indústrias.
<b>Mentink (2014)</b>	Sistema econômico com <i>loops</i> de materiais.
<b>Abramovay, R. (2014)</b>	O autor afirma que não se trata de reciclagem. Traz a discussão para uma logística reversa global e destaca a influência estratégica sobre o <i>design</i> dos produtos, seu consumo e a recuperação dos materiais em que se apoia.
<b>Ghisellini et al (2016)</b>	Promoção da adesão dos padrões de produção de <i>loop</i> fechado, juntamente com um sistema econômico, no qual se objetiva o aumento da eficiência de utilização de recursos, a fim de melhorar o balanceamento e a harmonia entre a economia, meio-ambiente e sociedade.
<b>Rizos et. Al (2016)</b>	Um conceito enraizado em diferentes escolas de pensamentos; elabora teorias que questionam a predominância do modelo de economias lineares, as quais assumem que os recursos são infinitos.
<b>Winas et al. (2017)</b>	Capitalizar a reciclagem de fluxo de materiais e equilibrar o crescimento e desenvolvimento econômico com o meio ambiente.
<b>Adams. K etl (2017)</b>	Evita o desperdício, juntamente com a reciclagem de <i>loop</i> fechado, se tornando uma componente chave para a sua designação na legislação alemã, porém na legislação chinesa o termo é direcionado ao <i>ecodesign</i> , produção mais limpa ( <i>cleaner production</i> ), parques eco-industriais e redes que criam uma sociedade orientada à reciclagem.

Fonte: Autor

No contexto da EC, os aspectos como a colaboração entre cadeias de valor e setores industriais para o estabelecimento de um sistema circular de larga escala são aspectos frequentemente abordados (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2010). Durante a última década, as empresas têm sistematicamente implementado modelos circulares, visando o ciclo de vida dos produtos, componentes e saídas de resíduos úteis. Essa ação molda o crescimento dos mercados de bens secundários suportados por modelos circulares da cadeia de fornecimento, nos quais as organizações de diversos setores desempenham um sistema mais interativo e colaborativo.

Su et al. (2013) mencionam que os princípios norteadores da economia circular são denominados como “3R” (reutilização, reparação e remanufatura), que têm uma dimensão local ou regional e são capazes de evitar ou reduzir as embalagens, custos de transporte e custos de transação, através da manutenção da propriedade. Os princípios 3R podem ser integrados por mais três princípios adicionais, desenvolvidos pela Ellen Macarthur Foundation (2010). O primeiro deles (1R), design apropriado, salienta a importância da fase de projeto na busca de soluções para evitar descargas de resíduos em aterros: “Os produtos são concebidos para um ciclo de desmontagem e reutilização”. O segundo (2R) apresenta uma reclassificação dos materiais em “técnicos” e “nutrientes”. Os materiais técnicos (como metais e plásticos) são concebidos para ser reutilizado no final do ciclo de vida, enquanto os nutrientes, biológicos, em geral são não tóxicos, “pode[m] retornar de forma segura à biosfera ou em uma cascata de utilizações consecutivas”. O terceiro princípio adicional (3R), “renovável”, coloca a energia renovável como a principal fonte de energia para a economia circular, a fim de reduzir a dependência da energia fóssil e melhorar a capacidade de adaptação (resiliência) do sistema econômico. Complementando os princípios dos 3R, Ghisellini et al (2016) os classificam conforme descrito no Quadro 2:

Quadro 2 - Princípios dos 3Rs da EC

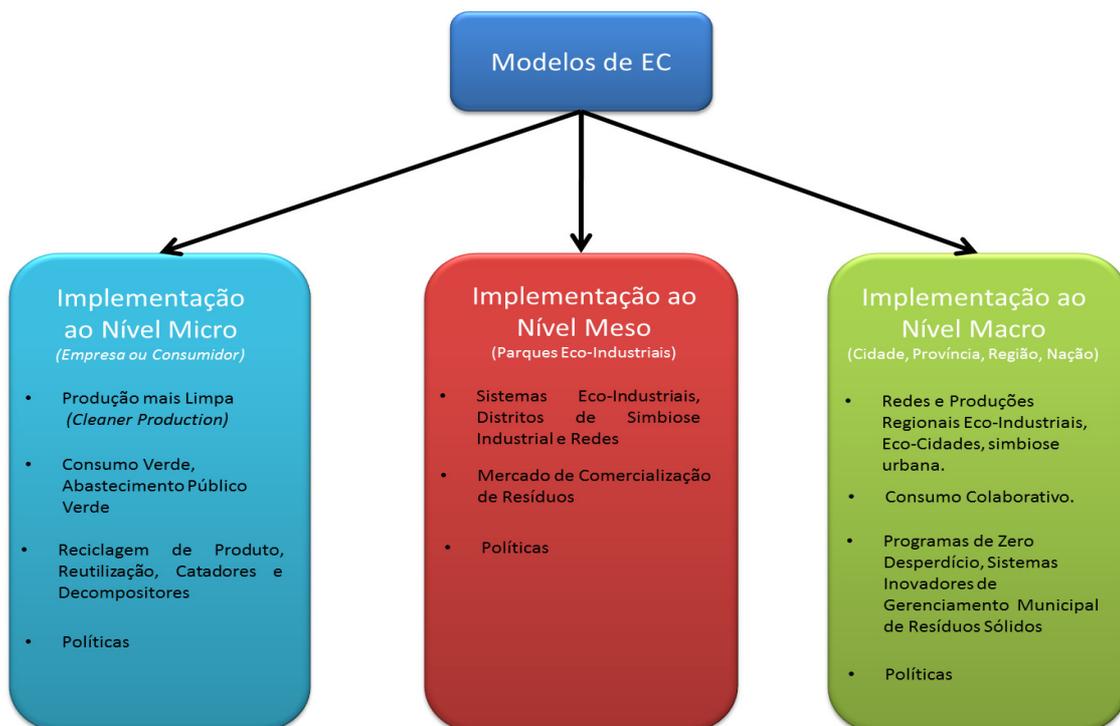
<b>Redução</b>	Princípio que objetiva minimizar a entrada de energia primária, matérias-primas e resíduos, através do aperfeiçoamento da eficiência na produção (chamada de ecoeficiência) e consumo de processos, introduzindo-se melhores tecnologias ou produtos mais compactos e mais leves ou embalagens simplificadas.
<b>Reuso</b>	Princípio que se refere a qualquer operação em que produtos ou componentes não são desperdiçados, mas sim utilizados novamente para o mesmo propósito ao qual foram concebidos.
<b>Reciclagem</b>	Princípio operacional de recuperação, em que resíduos de materiais são reprocessados em produtos, materiais ou substâncias para seu meio original ou outros propósitos. Isso inclui o processamento de material orgânico, porém não inclui recuperação de energia e reprocessamento de materiais que são utilizados como combustíveis de processo industrial.

Fonte: Autor adaptado de Ghisellini et al, 2016, p. 15.

Através da literatura (LEWANDOWSKI. 2016; GHISELLINI ET. AL. 2016), observa-se que o interesse pela pesquisa na área da economia circular se dá em diferentes escalas: micro (ex.: empresa ou consumidor); meso (ex.: parque ecoindustrial); e macro (nível regional,

idades). Ainda Ghisellini et, al. 2016, através de uma revisão detalhada da literatura, elaboram um modelo teórico sobre os diferentes assuntos e categorias que convergem à pesquisa do modelo de economia circular. Baseando-se nesse modelo teórico, os modelos de economia circular e seus respectivos níveis de implementação (cada modelo de economia circular possui suas próprias políticas de implementação) explicam essas diferentes escalas na área de economia circular. Na Figura 1, observam-se os níveis de implementação da economia circular, baseados na pesquisa de Ghisellini et, al. 2016.

Figura 1 – Níveis de implementação da Economia Circular



Fonte: Autor adaptado de Ghisellini et. al. 2016, p. 16

A escala de implementação a nível micro (empresa ou consumidor) está dividida em modelos de níveis produtivos, produção mais limpa (*cleaner production*), modelos em nível de setores consumidores como consumo verde (ex.: *eco-label*) e abastecimento público verde; ao nível de gerenciamento de resíduos, divide-se em reciclagem de produto, reutilização, catadores e decompositores.

Na escala de implementação a nível meso (parques ecoindustriais), essa divisão ocorre em níveis de sistemas ecoindustriais, simbiose de distritos e redes industriais. Nos sistemas industriais, as indústrias que tradicionalmente trabalham como entidades separadas se

envolvem em complexos de troca de recursos (material, água, energia e subprodutos), denominada “simbiose industrial”, com o objetivo de alcançar benefícios econômicos e ambientais (GHISELLINI ET, AL. 2016).

Segundo Zhu et al., 2007 apud Ghisellini et, al. 2016, a essência da simbiose industrial está focada na vantagem da utilização de subproduto, ao mesmo tempo em que reduz os produtos residuais ou os trata de forma eficaz. O termo é geralmente aplicado a uma rede de empresas independentes que trocam subprodutos e possivelmente compartilham outros recursos comuns.

As experiências internacionais de simbiose industrial encontram-se principalmente remontadas pelos principais países (Parques Ecológicos Industriais – EIP, por exemplo, os EUA, Canadá e Ásia) e estratégias *bottom-up* (simbiose industrial em distritos ou ecossistema industrial como Kalundborg – Dinamarca).

Segundo Ghisellini et al. (2016), as ecocidades recebem subsídios para investir em projetos inovadores de reciclagem. O sucesso de tais programas deve-se aos aspectos legais, sociais, econômicos e fatores tecnológicos, como a evolução do quadro legislativo para a adoção de uma sociedade orientada à reciclagem, à responsabilidade compartilhada da sociedade sobre a necessidade de proteção ambiental, à redução dos riscos da empresa, das despesas de capital por meio de subsídios, da diversificação de atividades das empresas, e à melhoria da capacidade tecnológica em setores industriais específicos. As ecocidades estão localizadas na Europa (Alemanha, Suécia e Inglaterra), na Ásia, em países como China (Beijing, Shanghai, Tianjin e Dalian) e Japão (VAN BERKEL ET AL., 2009).

Outra vertente a nível macro são os modelos de consumo colaborativo (emprestar, trocar, alugar, presentear) e a servitização sustentável é um modelo que agrega na implementação do consumo colaborativo (VEZZOLI ET. AL. 2015). Este modelo de consumo é a base para um melhor desempenho de economia circular, no qual existem vantagens em termos de maior geração de emprego e eficiência de recursos de um modelo de negócios, principalmente com base na venda de serviços, em vez da venda de produtos.

## 2.2 MODELOS DE NEGÓCIO CIRCULAR

A implementação de modelo de negócio circular incentiva a concepção de cadeias de fornecimento circulares ou reversas, permitindo que os produtos no final do seu ciclo de vida entrem novamente na cadeia de abastecimento como um *input* de produção através da reciclagem, reutilização ou remanufatura (NASIR ET AL., 2017; VORASAYAN AND RYAN, (2006); FERRER AND SWAMINATHAN, 2010). A colaboração efetiva entre cadeias e setores torna-se imperativa para o estabelecimento de um sistema circular de larga escala (AYDIN; KWONG, 2015; GENOVESE ET AL., 2017; GERMANI ET AL., 2015; ZHU ET AL., 2015).

Linder e Williander (2015) definem um modelo de negócio circular como um modelo de negócio em que a lógica conceitual para a criação de valor baseia-se no valor econômico obtido com a reutilização de um produto para a produção de novas ofertas. Bocken et al. (2016) discutem sobre o modelo de negócio sustentável descrevendo-o como um modelo de negócio que cria vantagem competitiva através do valor superior ao cliente e contribui para um desenvolvimento sustentável da empresa e da sociedade.

Segundo Nasir et al. (2017), a implementação do modelo de negócio circular incentiva a concepção de cadeias de fornecimento circulares ou reversas, permitindo que os produtos no final do seu ciclo de vida entrem novamente na cadeia de abastecimento como um *input* de produção através da reciclagem, reutilização ou remanufatura. Ainda segundo Nasir et al. (2017) mencionam que pontos como a colaboração efetiva entre cadeias e setores tornam-se imperativos para o estabelecimento de um sistema circular de larga escala.

Segundo Lewandowski (2016), o conhecimento abrangente na concepção de modelos de negócios circulares estimula e garante a aplicação da economia circular em um nível micro. Conforme explicado no tópico acima, referente à escala de implementação ao nível micro (empresa ou consumidor), essa implementação se divide em: (1) modelos de níveis produtivos; (i) *ecodesign*; e (ii) produção mais limpa (*cleaner production*); (2) em modelos em nível de setores consumidores; (i) consumo verde (ex.: *ecolabel*); e (ii) abastecimento público verde; e (3) ao nível de gerenciamento de resíduos; (i) reciclagem de produto; (ii) reutilização; (iii) integração dos catadores e decompositores.

Dentro dos processos de produção da empresa, incluem-se a produção mais limpa (*cleaner production* – CP), o *ecodesign*, ou *design* verde, *design* para o meio ambiente (DFE), tornando-se as principais estratégias consideradas preparatórias para a EC (WRINKLER, 2011).

Genovese et al. (2017) mencionam que os meios de alinhamento entre as cadeias de suprimento com os princípios da economia circular têm se tornado uma estratégia importante para as organizações no *ecodesign*. A adoção de um programa de economia circular implica que a empresa realize diferentes estratégias para melhorar a circularidade do seu sistema de produção e também coopere com outras empresas sobre a cadeia de suprimentos, com a finalidade de realizar um padrão circular mais efetivo (WRINKLER, 2011).

Segundo Borchat (2007), dentre as práticas apresentadas na aplicação dos conceitos de *ecodesign* na indústria, destacam-se: (1) escolha de materiais de baixo impacto ambiental; (2) projetos voltados à simplicidade e modularidade; (3) redução do uso de energia na produção, na distribuição e durante o uso dos produtos; (4) uso de formas de energia renováveis; (5) produtos multifuncionais; (6) produtos com maior durabilidade; (7) recuperação de embalagens; e (8) não utilização de substâncias perigosas. As práticas apresentadas não são únicas e, segundo o autor, a área sempre está em dinâmico desenvolvimento, adquirindo aprendizado e acompanhando a evolução tecnológica.

Segundo Genovese et al. (2016), globalmente, a CP é considerada uma estratégia essencial para EC e o desenvolvimento sustentável em que a CP introduz produtos, processos e serviços mais limpos com o objetivo de redução dos fluxos de resíduos e emissões, bem como para evitar o uso de energia não renovável e fluxos de prejudiciais de entrada. Em alguns casos, a CP é a primeira estratégia importante para atingir os objetivos do EC.

Ainda Genovese et al. (2016) definem que a promoção da responsabilidade aos consumidores é crucial para fomentar a compra e a utilização de produtos e serviços mais sustentáveis. Instrumentos funcionais para consumidores “verdes” são oriundos de informações específicas e sistemas de rotulagem que abrangem alimentos, produtos não alimentares e serviços. Os sistemas de rotulagem estão em desenvolvimento em todos os continentes: na Europa, na Ásia, Norte e Sul das Américas e na Austrália (ABAL, 2015).

Complementando o estudo sobre a importância do consumo de produtos inseridos no contexto de EC, Yang E Hanzen (2016) destacam também a importância da conscientização e das estratégias de *marketing* para a reutilização de produtos remanufaturados. A intensificação de compra de produtos remanufaturados deve ser influenciada positivamente pelo valor percebido, influenciado pela garantia da qualidade, pelo conhecimento sustentável “verde” e seguido pela sua vantagem em custo.

Segundo Genovese et al., 2016, a gestão de resíduos foi considerada no passado apenas uma maneira de se livrar dos resíduos por aterro ou incineração. Este ainda é o padrão de

disposição dominante em todo o mundo, gerando uma enorme perda de recursos valiosos e pesados impactos ambientais.

A nova maneira de ver o desperdício é emergente, que reconhece a gestão de resíduos como uma recuperação de recursos e prevenção de impacto ambiental. Ao se implementar a gestão de resíduos, essa gestão se torna um importante subsetor da EC, pois há o surgimento de novas tipologias de operadores e processos, entre os quais são chamados de “catadores/eliminadores” e “decompositores” (o termo *decompositor* se refere às empresas capazes de extrair recursos sem resíduos, aplicando tecnologias de recuperação inovadoras). No mundo biológico, os “catadores” e “decompositores” são peças fundamentais em cada ecossistema e da cadeia alimentar, contribuindo para manter o meio ambiente limpo, processando matéria orgânica e gerando plantas com substâncias essenciais para a vida humana.

Ainda, Genovese et al. (2016) destacam que os “catadores” recolhem os recursos de resíduos dentro de empresas ou em outros pontos da cadeia de descarte e os redistribuem ao sistema de empresas que reutilizam ou reciclam esses materiais, tornando-se agentes facilitadores do trabalho. Após a coleta de resíduos, alguns dos decompositores realizam o desmantelamento, a triagem e o transporte para os decompostos de uma forma que seja prontamente acessível ao processo produtivo. Em sequência ao processo, os “decompositores” transformam ou reciclam recursos de descartes em novos materiais ou frações dos mesmos fluxos de entrada, os quais foram inicialmente projetados.

No estudo de Huang et al. (2009) mostra-se a interação dos catadores e decompositores em um mercado de alto crescimento no mundo, especialmente na China e no Japão: o mercado de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE). Devido à inovação tecnológica e ao *marketing* intensivo, a taxa de atualização e consumo de EEE cresce exponencialmente, juntamente com a diminuição de seu ciclo de vida. Como resultado, as quantidades de resíduos de PCBs (placas eletrônicas) estão dramaticamente aumentando. O Programa do Meio Ambiente da ONU estima que mundialmente gera-se em torno de 20 a 50 milhões de toneladas de resíduos elétricos e equipamentos eletrônicos (WEEE) anualmente, e os montantes estão subindo três vezes mais rápido do que os de outras formas de resíduos urbanos. A Abal (2015) destaca a interação e socialização dos catadores e decompositores no ramo de embalagens no Brasil, especialmente para as latas de alumínio (esse tema será aprofundado no tópico do mercado de embalagens de alumínio no Brasil).

### 2.3 CONCEITO DO LIFE CYCLE COSTING (LCC) E SEUS RESPECTIVOS MÉTODOS APLICADOS NO CONTEXTO DA EC

De acordo com Swarr et al. (2011) e Hunkeler et al (2008), o código de prática do LCSA (*Life Cycle Sustainability Assessment*) consistiu em esforço de 3 anos de estudo da SETAC – Europe Working Group na definição de um *framework*, composto pela combinação da avaliação do ciclo de vida, custo do ciclo de vida ambiental e social, conforme demonstrado na Fórmula 1:

$$\text{LCSA} = \text{LCA} + \text{ELCC} + \text{SLCA} \quad (1)$$

O LCSA tem sido frequentemente associado nas análises de introdução do produto, pois abrange e fundamenta os impactos nos três pilares de sustentabilidade – Ambiental, Econômico e Social (NIERO ET. AL. 2017; SWAR ET. AL, 2011; HALL ET AL.; 2015). Niero e Hauschilda (2017) ressaltam que, diferentemente do LCC convencional, além de representar as avaliações financeiras tradicionais realizadas tipicamente por empresas individuais que se concentram nos seus próprios custos ambientais, o *Environmental Life Cycle Costing* (ELCC) no contexto da EC inclui os custos incorridos por todas as partes interessadas envolvidas em cima da avaliação financeira da perspectiva da empresa. O ELCC expressa o progresso contínuo do estudo para a proteção ambiental; na contabilidade, seu estudo foi impulsionado pelos fatores ecológicos, juntamente com a compreensão equilibrada de gestão. O objetivo de sua compreensão na área de gestão transformou o método ELCC diretamente aplicável à base informativa de custo e receita, relacionando o impacto do produto em recursos naturais e no meio ambiente. O custo total do ELCC complementou a compreensão tradicional do ambiente e do custo de ciclo de vida e melhorou a técnica do LCA, devido a sua definição de custo total no ciclo de vida do produto e seus custos ambientais (BIERNACKI, 2015).

Niero e Hauschilda (2017) conceituam o ELCC como uma análise de custo do ciclo de vida, resumindo todos esses custos associados ao ciclo de vida de um produto que esteja diretamente coberto por um ou mais dos atores no ciclo de vida do produto (por exemplo, fornecedor, produtor, usuário ou consumidor, gerenciamento do fim de vida).

O ELCC no contexto ambiental tipicamente conduz uma combinação com LCA para identificar as implicações ambientais e econômicas da estratégia empresarial analisada (HALL, 2015).

O principal argumento inicial do uso do LCC no contexto ambiental surgiu devido aos métodos (como o LCA) percebidos como obstáculos para o crescimento econômico. Isso diz respeito principalmente ao curto ciclo de vida de novas tecnologias (HUNKELER, 2008).

Os quadros principais da contabilidade de custo de proteção ambiental dependem da tecnologia física do produto durante o ciclo da vida. Deve-se analisar os cinco estágios expansíveis e especificados quando necessário: (i) pesquisa e desenvolvimento; (ii) produção; (iii) uso e manutenção; (iv) gerenciamento durante a redução; e (v) fase de reprocessamento (HUNKELER, 2008).

Complementando a definição do ELCC no contexto da sustentabilidade, Biernacki et al. (2015) descrevem que o ciclo de vida ambiental, ao oposto do LCC tradicional, introduz o custo do meio ambiente no aspecto da análise. Esses são custos econômicos de uso do meio ambiente como imposto ecológico, despesa de controle de emissões, despesa de produtos comerciais ecológicos. Na visão conceitual de ELCC, o custo deve ser registrado e fornecido na conta de ganhos e perdas. Esse processo gera entrada de mão-de-obra adicional. Sua atribuição muitas vezes baseia-se apenas na estimativa. Além disso, o ELCC analisa o custo do lado do consumidor, especialmente a despesa de eliminação de resíduos. Em outras palavras, em comparação com o LCC tradicional, é considerado o custo econômico ampliado pelos custos externos que surgirão futuramente (SWAR et al., 2011).

Segundo Biernacki et al. (2015), o ELCC não deve ser tratado como uma técnica independente, mas como uma técnica a ser percebida como a suplementação de uma análise LCA. A partir desse princípio, deve-se conduzir sua aplicação de forma analógica ao de um procedimento ou uma técnica. Como citado anteriormente, o LCA define-se como um método padronizado de estimativa sobre a influência do produto sobre o meio ambiente e a utilização de recursos ao longo de seu ciclo de vida. Inclui a extração de matérias-primas, a produção, o uso do produto pelos consumidores finais, reciclagem, recuperação de energia e disposição final dos resíduos. O ELCC deve ser considerado como suplementação para as normas do ciclo de vida ISO 14040 e ISO 14044. Segundo Biernacki (2015), as etapas da fórmula básicas para a elaboração do ELCC seguem a estrutura da Equação 2.

$$\text{ELCC} = \text{Cic} + \text{Cin} + \text{Cs} + \text{Co} + \text{Cm} + \text{Cs} + \text{Cenv} + \text{Cd} \quad (2)$$

Onde:

- a) Cic = Custo de Investimento Inicial;
- b) Cin = Custo de Instalação;

- c) Cs = Custo de Energia;
- d) Co = Custo de Operação;
- e) Cm = Custo de Reparo e Manutenção;
- f) Cs = Custo Exploratório e Custo de Perda Produtiva;
- g) Cenv = Custo Ambiental;
- h) Cd = Custo de Descarte, Reprocessamento, Reinvidicação.

A Fórmula 1 indica apenas a base de saída, individualmente modificada por cada variável e ajustada para uma escolha específica. O ELCC deve incluir o risco do investidor, utilizando a presunção de taxa de desconto, uma vez que se determinam itens de categoria que têm impactos no meio ambiente. Os números são: 0,1% para o esgotamento de recursos, 0,01% para a mudança climática, e 0,001% para toxicidade (BIERNACKI et. al, 2015).

Segundo Miah et al. (2017), o ELCC possui uma classificação similar à Fórmula 1, descrita por Biernaki et al. (2015), porém em sua fundamentação teórica destaca-se a necessidade de se separar do LCC Convencional (CLCC) os custos de investimento, operacionais, manutenção, descartes e custos de externalidades dos elementos diretamente gerados pelo ELCC, que são os custos e faturamentos de cada estágio (incluindo os custos externos) gerados ao longo do ciclo de vida do produto. Miah et al. (2017) ressaltam a importância de trazer todos os custos futuros para o valor presente (NPV). A descrição da equação definida por Miah et al. (2017) encontra-se na Equação 3.

$$T_{CLCC} = \sum_{Investimento} C_n X_{n+} + \sum_{Operação} C_n X_{n+} + \sum_{Manutenção} C_n X_{n+} + \sum_{Descarte} C_n X_{n+} + \sum_{Externalidade} C_n X_{n+}$$

(3)

$$T_{ELCC} = \sum_{Matérias Primas} C_n X_{n+} + \sum_{Manufatura} C_n X_{n+} + \sum_{Uso} C_n X_{n+} + \sum_{Descarte} C_n X_{n+} + \sum_{Externalidade} C_n X_{n+}$$

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Onde:

- a) C e X representam os fatores de custo e elementos de custo;
- b) N representa estágio do ciclo de vida;
- c) Ct representa o custo total;
- d) R representa Taxa Média Atrativa ou Taxa de Juros;
- e) t representa o Período de estudo.

Nota-se que as componentes de custos ELCC se diferem dos princípios da metodologia LCA, porque o ELCC inclui não apenas o impacto ambiental, mas também os custos operacionais, donde se pode concluir que o ELCC e o LCA se completam. No entanto, o ELCC não é um método de conta financeira: define-se como um método de gestão de custos para um desenvolvimento sustentável, com a finalidade de prever o custo de cada produto. A LCA não se define como um método contábil, porém necessário para receber informações sobre o impacto total de um produto no meio ambiente.

O objetivo do ELCC necessita ser determinado antes da pesquisa e sua gama de implementação, sendo importante determinar as variáveis do sistema, bem como a unidade contábil de custos afetada. Segundo Biernacki et al. (2015); a gama de atividades utilizadas para definir ELCC segmenta-se como: (a) determinação do custo total do sujeito e do lado do consumidor; (b) avaliação da competitividade do produto; (c) determinação do custo ao consumidor; (d) relatórios, monitoramento e determinação de custos ativos dentro das empresas; (e) alcance de acordo ao nível gerencial quanto ao portfólio de produtos e sua correlação com a ELCC; (f) possíveis alternativas de identificação; (g) identificação dos compromisso entre aspectos econômicos e ambientais; (h) definição e determinação da responsabilidade social corporativa (CSR) em conjunto com a avaliação de impacto social; (i) identificação do potencial da empresa em determinar os custos em longo prazo, juntamente com os benefícios potenciais econômicos ao consumidor na influência do EoL (*end of life*, ou fim de vida) ao meio ambiente e sua ameaça à população; (j) definição do relacionamento entre critérios individuais (custo interno comparado ao externo custo); e (h) definição de um ciclo de vida otimizado em relação a diferentes mudanças e compra de material sistema.

Para se elaborar um ELCC conforme seu código de prática, Hall (2015) sugere que as externalidades futuras devem ser internalizadas e serão relevantes no processo de decisão, sendo necessária sua inclusão no LCC. Alternativamente, os custos relevantes para a sustentabilidade do sistema necessitam ser incluídos, e independentemente da probabilidade

estimada de sua implementação altera-se o papel do ELCC de custo-efetividade para um tomador de decisão mais amplo de valores econômicos.

### **2.3.1 Estrutura de Produto baseado na Análise do Ciclo de Vida Integrado (PSLIA)**

PSILA (*Product Structure-Based Integrated Life Cycle Analysis*), ou Estrutura de Produto baseado na Análise do Ciclo de Vida Integrado, é um modelo teórico criado por Low et al. (2014), descrito como uma técnica de modelagem e análise de custo em sistemas produtivos de ciclo fechado. Inicialmente, essa técnica foi desenvolvida para atender as lacunas que os métodos de LCC possuíam na integração do ciclo de vida do produto em sistemas de ciclo fechado, porém sua aplicação se mostra útil em mais dois fatores para o design desse sistema: (1) em produtos com alta complexidade, pois permite que essa técnica realize a repartição do sistema produtivo de ciclo fechado em menores modelos de subsistemas; e (2) na união das fases do sistema produtivo principal (*Mainstream Production System – MP*), com o sistema do final de vida do produto (Eol), permitindo a captura dos custos do ciclo fechado em ambas as fases. Low et. al (2014) citam que a adoção de estratégias de produção em ciclo fechado auxilia os fabricantes a cumprir os princípios de responsabilidade estendida ao fabricante, ou EPR (*Extend Producer Responsibility*). O EPR é um programa definido por lei federal ou estadual que controla a quantidade de produtos em EoL descartados em aterros sanitários. O EPR induz os fabricantes a manter a competitividade, adotando estratégias e investimentos para gestão de resíduos, introduzindo princípios que realizam a gestão do ciclo de vida do produto. De acordo com Oliveira et al. (2016), no Brasil o EPR é chamado de Política Nacional de Resíduos Sólidos, ou PNRS. O PNRS determina que a responsabilidade sobre o resíduo seja compartilhada entre quem produz e consome, além de exigir do fabricante uma análise do ciclo de vida do produto e sua produção (o LCA, conforme descrito anteriormente).

A adoção de estratégias de economia circular em ciclo fechado corresponde a uma das principais ferramentas para a gestão desses resíduos, a fim de se cumprir os requisitos da PNRS ou EPR. Ao se adotar modelos de ciclo fechado, a análise dos modelos de custos se torna a principal ferramenta para a introdução de estratégias de ciclo fechado pelos tomadores de decisão do negócio, porém sua modelagem no sistema é uma tarefa que pode ser de alta complexidade (LOW et al., 2016a).

Sua complexidade deriva da integração de custos dos produtos durante a fase EoL, os quais serão reutilizados durante a fase principal de produção, ou MP. Dependendo da estrutura de fabricação, o produto pode possuir múltiplos módulos, componentes e materiais que poderão

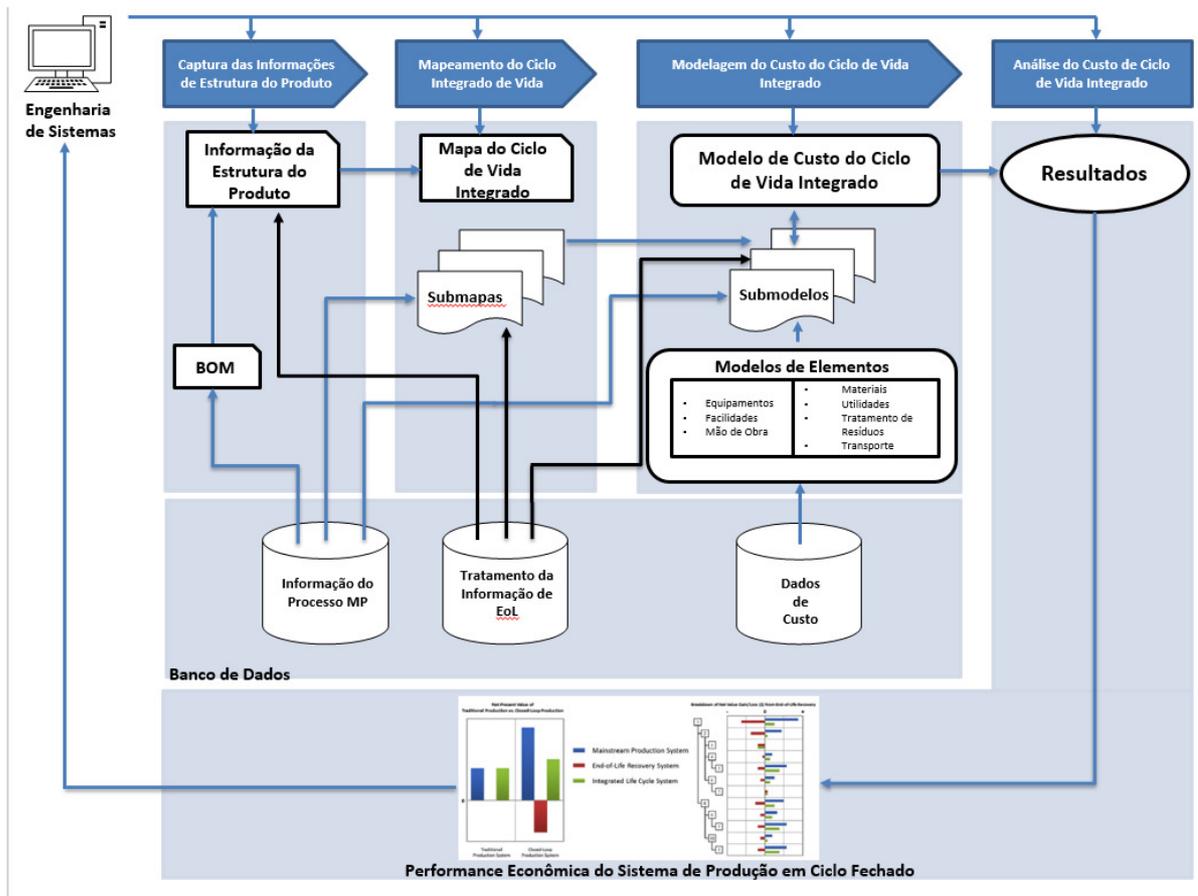
entrar no ciclo fechado de produção. O direcionamento de uma análise de custos que indicam a viabilidade da operação permite aos tomadores de decisão do negócio autorizar a divisão da capacidade produtiva entre equipamentos e estruturas da fábrica entre os processos produtivos principais ou MP e os processos de EoL (LOW ET. AL, 2014).

O PSILA auxilia no direcionamento dos custos a fim de se orientar a tomada de decisão no negócio, pois verifica a viabilidade de implementação do sistema produtivo em ciclo fechado. O próximo passo da fundamentação teórica do PSILA consiste em descrever a estruturação das fases de implementação do PSILA e suas principais fórmulas matemáticas referentes à elaboração dos custos em sistema de ciclo fechado – pois sua utilização servirá como guia na elaboração e a análise dos custos dos estudos de caso (Seção de Métodos e Materiais).

Como descrito anteriormente, a técnica do PSILA permite aplicar uma repartição de custos através de uma divisão entre subsistemas que serão posteriormente modelados. Esses subsistemas são capturados através de uma análise BOM (*Bill of Material*, ou lista de materiais), os quais são modelados e analisados durante o ciclo de vida do produto, permitindo que haja integração da análise de custos dos subsistemas em ciclo fechado entre as fases EoL (Final de Vida) e MP (fase principal de produção).

Para que a modelagem e a análise da performance econômica do sistema em ciclo fechado sejam inicialmente estruturadas, Low et. al (2014) desenvolveram o modelo teórico descrito na Figura 2. As etapas para a aplicação da técnica PSILA são: (i) a captura das informações sobre a estrutura do produto; (ii) a integração do mapeamento do ciclo de vida do produto; (iii) a modelagem dos custos de integração do ciclo de vida do produto; e (iv) a análise dos custos de ciclo de vida do produto. Low et al, (2014) ressaltam que há um ponto importante antes da aplicação da técnica PSILA: a conceptualização do sistema produtivo em ciclo fechado. Nesse estudo, Low et al. (2014), em sua metodologia, utilizam como estudo de caso um monitor LCD ou FPD (*Flat-Panel Display*), conforme representado na Figura 3.

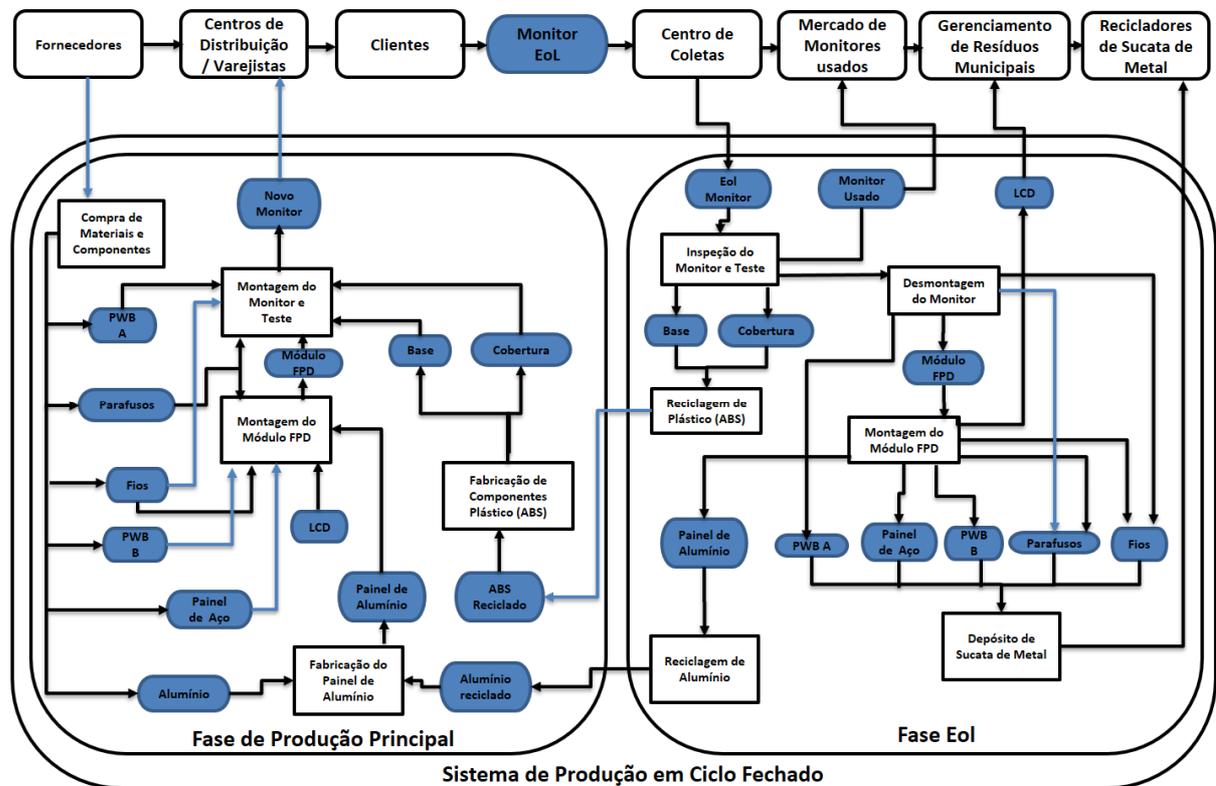
Figura 2 – Framework para aplicação da técnica do PSILA



Fonte: Autor adaptado de Low et. al., 2014, p.107.

A etapa (i) da captura da informação da estrutura do produto consiste em três sub-etapas: (a) a Decomposição da Estrutura do Produto, quando serão analisadas as relações hierárquicas entre partes e peças e decomposto sua estrutura; (b) *Part Ratios* (taxas por partes, ou PR), análise da quantidade de cada parte necessária para a composição do final do produto e as quantidades de partes recuperadas dos produtos em EoL; e (c) *Outgoing Fractions* (OF), análise das frações dos produtos em EoL e suas operações como descarte, venda ou reutilização na fase MP. O sistema que auxilia na captura das informações do produto são as informações oriundas do BOM e sua informação correlacionada no DBOM (*Disassembly Bill of Materials*, ou informações da lista de materiais desmontados).

Figura 3 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para o monitor LCD ou FPD.



Fonte: Autor adaptado de Low et. al 2014, p. 107

Após a captura da estrutura das informações do produto, realiza-se a estruturação entre as fases MP e EoL, conforme mostrado na Figura 4, com a finalidade de se completar a análise dessa etapa.

Figura 4 - Estrutura de informação do produto

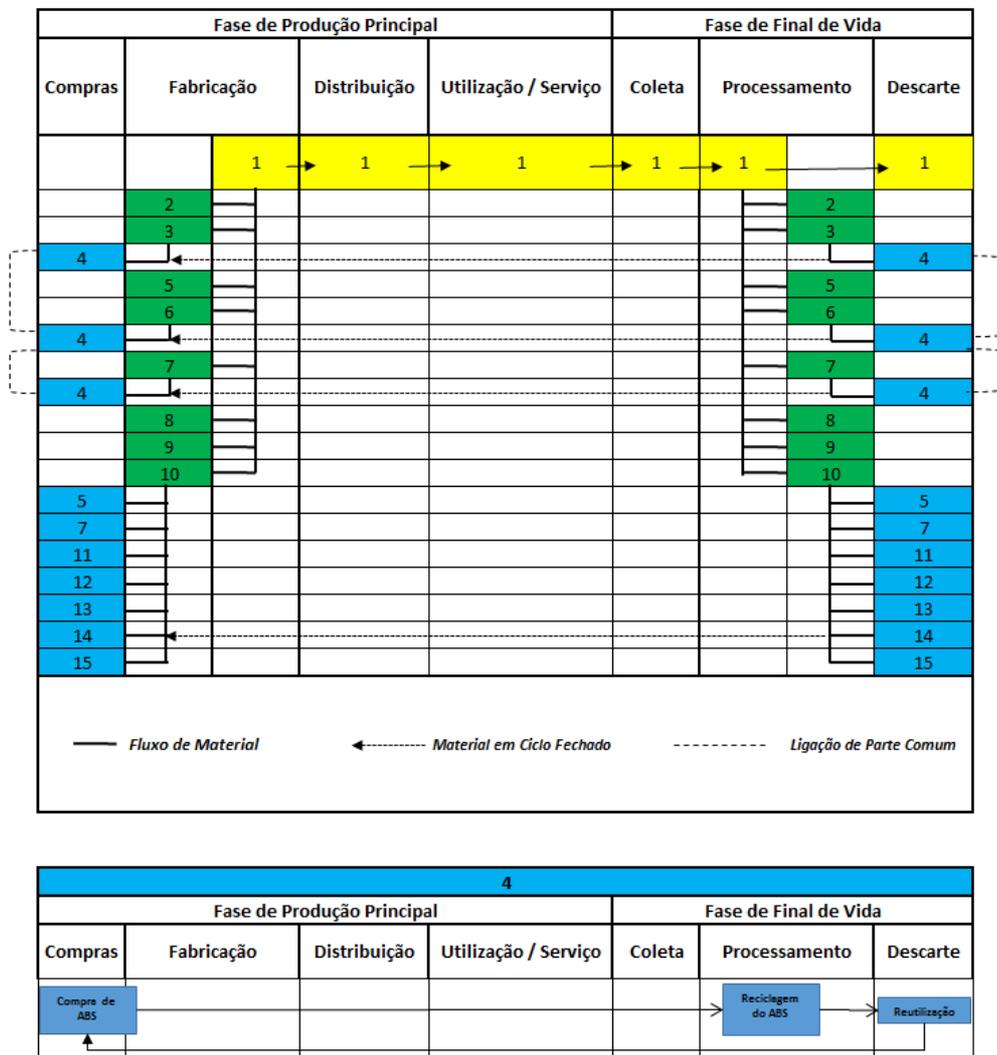
	Mainstream Production Phase					End-of-Life Phase					
	Peças	Número da Peça	Descrição da Peça	PRes(i) (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça	Opção de EoL	Eficiência da Sucata	Peças	Descrição Qualitativa da Peça EoL	PRes (i) (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça
	1	1	21" Flat-Panel Display (FPD) Monitor	-	Unidade	Revenda & Recuperação	30%	1	Monitor Usado	-	Unidade
	2	2	Cabos	1	pcs	Venda de Sucata de Metal	0%	2	Monitor Não-Vendável	-	pcs
(Nest)	3	3	Base	1	pcs	Reciclagem Interna	100%	3	Cabos Usados	1	pcs
(Child)	4	4	ABS (Plástico)	0,72	Kg	Reciclagem em Ciclo Fechado	0%	4	Sucata de Plástico	1	pcs
	5	5	Parafusos	4	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	5	ABS Reciclado	0,72	Kg
(Nest)	6	6	Gabinete Frontal	3	pcs	Reciclagem Interna	0%	6	Sucata de Metal Grade B	4	pcs
(Child)	7	7	Gabinete Traseiro	0,46	Kg	Reciclagem em Ciclo Fechado	98%	7	Sucata de Plástico	1	pcs
(Nest)	8	8	Conector	1	pcs	Reciclagem Interna	0%	8	Sucata de Plástico	11	pcs
(Child)	9	9	PWB (Placa Impressa de Cabeamento)	0,74	Kg	Reciclagem em Ciclo Fechado	98%	9	ABS Reciclado	0,74	Kg
	10	10	Flat-Panel Display (FPD)	1	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	10	Sucata de Metal Grade B	1	pcs
(Nest)	11	11	Parafusos	6	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	11	Sucata de Metal Grade A	1	pcs
(Child)	12	12	Conectores	2	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	12	Módulo EoL FPD	1	pcs
(Child)	13	13	PWB (Placa Impressa de Cabeamento)	1	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	13	Sucata de Metal Grade B	6	pcs
	14	14	Painel de Aço	1	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	14	Sucata de Metal Grade B	2	pcs
(Nest)	15	15	Painel de Alumínio	1	pcs	Venda de Sucata de Metal	100%	15	Sucata de Metal Grade A	1	pcs
(Child)	16	16	Alumínio AA1100 (Material)	0,414	Kg	Reciclagem Interna	0%	16	Sucata de Alumínio	1	pcs
(Child)	17	17	Painel de Display de Cristal Líquido	1	pcs	Reciclagem em Ciclo Fechado	98%	17	Alumínio Reciclado	0,414	Kg
	18	18	Alumínio reciclado	1	pcs	Tratamento de Resíduo (Incineração)	100%	18	Painel EoL	1	pcs

Fonte: Autor adaptado de Low et. al 2014, p. 110

A segunda etapa é a (ii) análise do mapeamento do ciclo de vida. Geralmente, cada tipo de produto possui seu ciclo de vida e suas características tanto para a fabricação, distribuição e

descarte. No estudo de Low et. al (2014) é analisada cada etapa do ciclo de vida para o estudo de caso, segmentadas entre: (a) estágio de operação de compra (*procurement*); (b) estágio de manufatura; (c) estágio de distribuição; (d) estágio de utilização; e (e) serviço para a fase MP. Para a fase Eol, têm-se: (a) estágio de coleta; (b) estágio de processamento; e (c) estágio de descarte. A representação da análise do mapa do ciclo de vida integrado do produto é mostrada na figura 5, juntamente com um exemplo de subsistema do plástico.

Figura 5 - Mapa e Submapa (4) do Ciclo de Vida Integrado do Monitor LCD



Fonte: Autor adaptado de Low et. al 2014, p. 110

O mapeamento do ciclo de vida, juntamente com a decomposição do produto, auxilia na visualização dos componentes ou materiais que estarão em ciclo fechado com sua fase de integração, assim como uma orientação temporal sobre o fluxo dos materiais que serão

utilizados. O terceiro estágio é (iii) a modelagem dos custos do ciclo de vida integrado do produto. No estudo de Low et. al (2014), analisa-se o ciclo de vida do monitor e sua margem de lucro no sistema. Como o objetivo desse trabalho é somente a mensuração dos custos, serão demonstradas somente as fórmulas relacionadas a essas aplicações de custos, durante os estudos de casos.

Na elaboração dos custos de um sistema em ciclo fechado, inicialmente, é importante especificar dois parâmetros necessários: (i) o volume de pedido; e (ii) o volume de recuperação. Esses parâmetros definem as interfaces entre os submodelos e as relações hierárquicas entre os subsistemas e o sistema do ciclo fechado de produção. Essas duas variáveis são definidas conforme as Equações 4 e 5.

$$OV_i(t) = \sum_j PV_{i(t)} \cdot PR_{mp_{j(t)}}, \quad i \in \{\text{root}\} \quad (4)$$

$$RV_i(t) = \sum_j RV_{i(t)} \cdot PR_{eol_{j(t)}} \cdot (1 - OF_{EoL,j}), \quad i \in \{\text{root}\} \quad (5)$$

Onde:

- a)  $i$  (número da parte indexadora que identifica o subsistema baseado na estrutura dos produtos),  $j$  = número de peças parentes de partes  $i$ ,  $t$  (período de estudo),  $\{\text{root}\}$  número das partes indexadas na decomposição estrutural do produto que representa o produto;
- b)  $OV_i(t)$  = Volume de Pedidos de parte  $i$  no tempo  $t$ ;
- c)  $PV_{j(t)}$  = Volume de Produção da peça  $i$  no tempo  $t$ ;
- d)  $RV_i(t)$  = Volume de Recuperação de peças  $i$  no tempo  $t$ ;
- e)  $PR_{mp_{j(t)}}$  = Parâmetros de Interface que definem as quantidades de peças  $i$  requisitadas na produção de quantidades unitárias para suas peças mães  $j$  durante o MP.
- f)  $PR_{eol_{j(t)}}$  = Parâmetros de Interface que definem as quantidades de peças recuperadas requisitadas na produção de quantidades unitárias para suas peças mães  $j$  durante a fase Eol
- g)  $OF_{EoL,j}$  = Parte Fracionárias de saída da fase Eol, sendo elas reutilizadas ou vendidas no sistema.

Segundo Low et. al (2014), em um sistema fechado de produção, as partes e peças recuperadas na fase EoL retornarão na fase MP como recursos, que substituirão as peças, materiais ou partes virgens. Essa relação cria o conceito de ciclo fechado entre as duas fases do ciclo de vida, integrando o sistema produtivo de ciclo fechado. A fim de se calcular essa relação matemática de produção dos materiais, as Equações 6 e 7 definem esse método:

$$PV = OV_{i(t)} - RV_{i(t)} \cdot OF_{EoL,j} \cdot B_{CL,i}, \quad (6)$$

$$B_{CL,i} = \begin{cases} 1, & \forall \in \{\text{ciclo fechado}\} \\ 0, & \forall \notin \{\text{ciclo fechado}\} \end{cases} \quad (7)$$

Onde:

- a)  $B_{CL}$  = Variável Binária; quando 1, a peça (i) está em ciclo fechado; 0, a peça não está em ciclo fechado.

A performance econômica em ciclo fechado deve ser medida no valor presente líquido ou NPV (*Net Present Value*) e essa simulação deve ser realizada tanto para os submodelos e subsistemas individuais como demonstrado na Equação 8, onde LC refere-se ao ciclo de vida integrado.

$$NPV_{LC,i} = NPV_{MP,i} + NPV_{EoL,i} \quad (8)$$

Os custos incorridos durante as fases MP e EoL são determinadas pelas Equações 9 e 10, conforme mapeado durante a análise de integração do ciclo de vida do produto.

$$C_{MP,i(t)} = C_{\text{procurement},i(t)} + C_{\text{manufacturing},i(t)} + C_{\text{Distribution},i(t)} + C_{\text{Service},i(t)} \quad (9)$$

$$C_{EoL,i(t)} = C_{\text{Coleta},i(t)} + C_{\text{Processamento},i(t)} + C_{\text{Descarte},i(t)} \quad (10)$$

Em um sistema de produção de ciclo fechado, Low et al (2014) destacam a importância de se considerar os custos variáveis e os fixos ocorridos devido ao investimento de capital para a execução dos estágios produtivos. Os custos totais fixos e variáveis em um estágio do subsistema são definidos pela Equação 11.

$$C_{\text{Estágio},i(t)} = CV_{\text{Estágio},i(t)} + CF_{\text{Estágio},i(t)} \quad (11)$$

Os custos variáveis incorridos nas fases serão definidos pelas Equações de 12 até 19. Um ponto importante a se destacar é que existem peças obtidas durante a fase EoL que não entrarão em ciclo fechado, porém serão vendidas a terceiros, gerando um faturamento a ser descontado do custo do produto representado pela Equação 8, onde  $P_v$  é o preço ou custo para realização das operações em cada estágio do ciclo integrado de vida, e  $SP_{EoL,i}$  é o preço de venda da peça ao fornecedor.

$$CV_{\text{compra},i(t)} = PV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{compras},vi} \cdot P_v \quad (12)$$

$$CV_{\text{Fabricação},i(t)} = PV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{Fabricação},vi} \cdot P_v \quad (13)$$

$$CV_{\text{Distribuição},i(t)} = OV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{Distribuição},vi} \cdot P_v \quad (14)$$

$$CV_{\text{Serviços},i(t)} = OV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{serviços},vi} \cdot P_v \quad (15)$$

$$CV_{\text{Coleta},i(t)} = RV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{Coleta},vi} \cdot P_v \quad (16)$$

$$CV_{\text{processamento},i(t)} = RV_{i(t)} \cdot \sum_v Q_{\text{processamento},vi} \cdot P_v \quad (17)$$

$$CV_{\text{Descarte},i(t)} = RV_{i(t)} \cdot OF_{EoL,i} \sum_v Q_{\text{descarte},vi} \cdot P_v \quad (18)$$

$$R_{EoL,i(t)} = RV_{i(t)} \cdot OF_{EoL,i} \cdot (1 - B_{CL,i}) \cdot SP_{EoL,i} \quad (19)$$

Os custos fixos incidem no sistema independentemente da variação do volume de produção gerado, porém podem ser influenciados pela capacidade do sistema, alterando diretamente o investimento de capital necessário para simular a capacidade de financiamento de investimentos em longo prazo e o capital para aquisição de ativos fixos (LOW et. al., 2014). Os custos fixos de cada subsistema podem ser calculados pelas Equações 20, 21 e 22.

$$CF_{\text{Estágio},i(t)} = \left\{ \begin{array}{ll} \sum_f I_f \cdot RA_{\text{estágio},fi}, & t = 0 \\ OC_{\text{estágio},i(t)}, & t > 0 \end{array} \right\} \quad (20)$$

$$I_f = Q_{\text{total},f} \cdot P_f - \frac{SV_f}{[1 + d]^{U_f}} \quad (21)$$

$$RA_{\text{Estágio},fi} = \frac{UT_{\text{Estágio},fi}}{UT_{\text{total},f}} \quad (22)$$

Onde  $f$  é o tipo de ativo fixo,  $I_f$  é a despesa de capital inicial requisitado para se comprar o ativo,  $Q_{\text{total},f}$  é a quantidade de ativos fixos  $f$  para se atender a demanda necessária,  $U_f$  é a quantidade total de ativos  $f$ ,  $SV_f$  é o valor residual do ativo  $f$  ao final do período de estudo,  $RA_{\text{estágio},fi}$  é o percentual de utilização do ativo  $f$ ,  $UT_{\text{Estágio},fi}$  é o tempo de utilização do ativo  $f$  para o processamento da peça  $i$ ,  $UT_{\text{total},f}$  é o tempo de utilização do ativo  $f$  no período de tempo,  $OC_{\text{estágio},i(t)}$  são os custos fixos de *overhead* (ex.: aluguel) durante o ciclo de vida para processar a peça  $i$  no período  $t$  e  $d$  a taxa mínima de retorno aceitável ou TIR.

## 2.4 EXTERNALIDADES

A habilidade em reconhecer os efeitos externos também contribui para melhorar a utilização dos dados coletados no LCC e LCA. Define-se que as externalidades ocorrem sempre que uma operação entre A e B tem consequências indesejadas, positivas ou negativas, para terceiros (STIGLITZ, 2000).

Podem-se categorizar tais efeitos – em especial, os efeitos externos negativos – em termos das quatro funções econômicas do meio ambiente e o conceito econômico de sustentabilidade: impacto negativo no valor dos serviços; extração de recursos em excesso, levando ao esgotamento; fluxos residuais nocivos para além da capacidade de assimilação de sistemas biológicos; redução da capacidade de regeneração dos sistemas de apoio à vida. No caso da externalidade negativa, a empresa muda os efeitos adversos prejudiciais, bem como os custos de lidar com esses efeitos, para outra pessoa. A externalidade positiva de uma empresa existe quando clientes, governos e/ou cidadãos recebem um “benefício não remunerado” (STIGLITZ, 2000). Ambos os tipos de externalidades levam a desvios do equilíbrio e, portanto, à alocação de recursos ineficientes (STIGLITZ, 2000).

Para controlar os níveis ambientais afetados pelas externalidades, algumas estimativas dos valores dos bens ambientais também são necessárias, como uma mensuração das consequências ambientais nos custos marginais de produção (referente à análise da relação entre volume de unidades produzidas com os custos médios, fixos e variáveis) para a atividade econômica da empresa. A contabilidade desses efeitos externos requer uma avaliação do ciclo de vida (ACV ou LCA – Apêndice A), a fim de se elaborar esses custos, contabilizando as

complexas vias envolvidas – tanto por meios diretos e indiretos (ANDERSEN, 2007). A análise LCA ajuda a controlar e atingir os objetivos da responsabilidade ampliada do produtor (EPR), com a finalidade de controlar a quantidade de produtos em fim de vida (EoL) que entram no fluxo de resíduos e aliviar o ônus sobre a gestão de resíduos municípios (OCDE), os quais abordam essas externalidades (LOW et al., 2016). No caso do Brasil, a EPR e a OCDE são abordadas na PNRS (Apêndice B).

Porém, entre as décadas de 70 e 80, pesquisadores sempre indicaram que uma externalidade que afetava o meio ambiente (e particularmente sempre pouco controlada e inadequada em legislações ao estado público) foi o controle das emissões de CO<sub>2</sub>, gerando um estado de alerta global (PALMER, 1991). Ainda, devido às rápidas alterações climáticas nos últimos anos, o governo britânico encomendou uma pesquisa para o economista do banco central inglês em 2005; Nicholas Stern (Vice-Presidente do Banco Mundial durante o período de 2000 até 2003), visando o entendimento dos aspectos econômicos das mudanças climáticas. O resultado desse estudo foi o levantamento de dados comprometedores ao planeta, derivando altos custos para a saúde humana, economia e meio ambiente, devido ao aumento dos GEE (Gases de Efeito Estufa). Stern concluiu em seu relatório que 20% do PIB mundial seriam comprometidos e gastos no ano 2050, caso os gases de efeito estufa não fossem diminuídos; porém, uma alternativa levantada para evitar esse problema foi o investimento 1% do PIB mundial por ano até 2050 em medidas preventivas, com uma variação de -1% (lucros líquidos) a +3,5% do PIB (SANTOS, 2010).

Carling et al. (2017) fazem uma discussão sobre a externalidade negativa que surge dos transportes rodoviários devido aos veículos que emitem CO<sub>2</sub> e mencionam a questão de cobrança de uma taxa com a finalidade minimizar os efeitos e internalizar esta externalidade. Mas um fator importante é que as empresas comecem efetivamente em seus modelos econômicos a integrar esta análise, contabilizando tanto as externalidades positivas como negativas. O autor destaca que o CO<sub>2</sub> corresponde a mais de 97% das emissões totais de GEE de fontes móveis. Neste cenário, o setor de logística precisa mudar o modo tradicional de desenvolvimento e deve tentar alcançar o desenvolvimento sustentável equalizando a logística reversa com a logística avançada, equilibrando os benefícios ambientais com os benefícios econômicos (SUN, QIANG., 2017). Simões et. al (2013) ressaltam que internalizar as externalidades através de avaliações monetárias ou financeiras possui uma alta complexidade; um método que pode ser utilizado é a quantificação dos custos referentes a emissão de CO<sub>2</sub> para futuras análises na tomada de decisão. Essas quantificações referentes ao CO<sub>2</sub> (custos) são realizadas na Europa pelo Esquema Europeu de Comércio de Emissões (ETS), porém as

externalidades  $SO_2$  e  $NO_x$  são internalizadas somente através de análise dos danos (SIMÕES et al., 2013).

Martinez-Sanchez et al. (2017) discutem a importância de incluir os custos das externalidades em sistema econômico, o que pode ter uma influência profunda na seleção de estratégias competitivas. A inclusão das externalidades ecológicas no processo de contabilização é fundamental para entender seus reflexos na empresa. Segundo Lima e Vegas (2002), conceitos já estão sendo apresentados por pesquisadores da área, mas estudos adicionais são necessários. Ainda segundo Lima e Vegas (2002), uma das formas de neutralizar as externalidades ecológicas é a internalização, ou seja, o reconhecimento de seus efeitos na apuração dos resultados da empresa. Li e Yu (2016) mencionam também a importância de internalizar as externalidades em modelos econométricos para processo decisório.

Weldu e Assefa (2017) e Sen et al. (2017) apresentam um estudo abordando os custos internalizados de efeitos externos, ou seja, custos que antes eram externalidades agora são internalizados em unidades monetárias, dentro do conceito de LCC. Neste estudo, os autores apresentam a tributação das externalidades do carbono como forma de contabilizá-lo internamente. Decisões estratégicas não são inteiramente baseadas em custos, mas elas sem dúvida desempenham um papel importante no processo decisório. O LCC é um método econômico para determinar todos os custos decorrentes durante todo o ciclo de vida de um projeto ou produto, desde a aquisição, instalação, operação, manutenção e disposição final da matéria-prima (HUNKELER et al., 2008; NGUYEN et al., 2008; SILALERTRUKSA, et.al, 2012; WELDU; ASSEFA, 2017). A execução de um LCC permite que os potenciais *drivers* de custo e economia de custos de um produto ou serviço sejam identificados ao longo de todo o seu ciclo de vida. Ao comparar diferentes alternativas, a opção mais rentável pode ser identificada. Uma variedade de métodos e abordagens foi desenvolvida sob o modelo do LCC, devido à heterogeneidade e aos cenários de aplicação das empresas analisadas (AUER et. al., 2017). O custo do ciclo de vida refere-se a todos os custos associados ao ciclo de vida do sistema do produto (pré-manufatura, manufatura, uso e pós-uso), levando em conta os efeitos das externalidades durante um determinado período do estudo (HAPUWATTE et al., 2016; HUNKELER et. al., 2008). O LCC também pode ser usado para comparar a relação custo-eficácia de decisões de investimentos alternativos.

Os conceitos e métodos têm de evoluir para ajudar a integrar e otimizar as considerações econômicas, sociais e ambientais, de modo que um cenário mais sustentável no futuro possa ser oferecido. De fato, os princípios de sustentabilidade não podem ser representados por indicadores tradicionais de sucesso econômico e qualidade ambiental, e sim por uma visão

integrada de meio-ambiente, economia e sociedade (KOPLIN et al. 2007). Baseando-se nesses temas, este trabalho tende a potencializar a internalização das externalidades, CO<sub>2</sub>, através de análises numéricas em todo seu ciclo de vida, utilizando a ferramenta LCC.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento da pesquisa foi efetuado em duas etapas: (1) Abordagem Qualitativa, através da análise de três modelos circulares – (a) embalagens alimentícias (metálicas; latas), (b) eletrônicos (impressora) e (c) linha branca (compressores herméticos), buscando-se entender em profundidade como as empresas estão trabalhando na estruturação de modelo de negócio na perspectiva da economia circular, atores envolvidos e proposta de valor; e (2) a aplicação do o método PSLIA e externalidades (CO<sub>2</sub>) para cada modelo de negócio.

Para a análise dos custos e externalidades foi aplicado o método PSLIA (Estruturação do Produto baseado na Integração da Análise de Ciclo de Vida). A escolha deste método se justifica pela integração do ciclo de vida do produto em sistemas de ciclo fechado. Foram reunidos dados primários e secundários. Os principais métodos de coleta de dados foram (i) entrevistas no local, complementadas com observações e (ii) outros dados secundários para contrastar com os dados da entrevista. Foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com diferentes níveis hierárquicos das respectivas organizações analisadas. O questionário de pesquisa encontra-se no anexo B.

Para a aplicação do método, as etapas foram desdobradas em: (i) análise do modelo de negócio de economia circular; (ii) demonstração do fornecimento da matéria-prima em ciclo fechado e o seu respectivo custo (aplicação da metodologia PSILA); (iii) análise das externalidades (implicações ambientais e sociais); e (iv) análise dos resultados com a ferramenta PSILA combinado com as externalidades.

#### 3.1. PERFIL DOS ENTREVISTADOS

Para a contextualização das embalagens de alimentícias (a), o profissional entrevistado para o levantamento de informações referentes à usina de alumínio foi o Gerente de Negócios, e para a Empresa Alimentícia, foram duas pessoas: (i) o Diretor Geral de Operações e (ii) o Gerente Comercial. Ambos contatos, da Usina de Alumínio e da Indústria Alimentícia, são formadores de opinião e responsáveis por decisões estratégicas de implementação no negócio. A empresa alimentícia, além do processamento do alimento, possui uma cadeia vertical em relação ao fornecimento de sua embalagem, sendo responsável pela fabricação da lata. A usina de alumínio, responsável pela fundição e laminação do alumínio, possui uma operação própria de reciclagem.

Referente à contextualização dos eletrônicos (impressoras jatos de tinta) (b), o questionário da entrevista foi enviado ao departamento de sustentabilidade da marca e respondido pela Gerência de Sustentabilidade e por um profissional responsável pela a operação de Sustentabilidade. Uma visita à empresa responsável pela gestão e reciclagem do produto foi realizada, e dados primários foram coletados com o Departamento de Comunicação e Engenharia (Líder de Processos). Com a finalidade de se agregar ao estudo e a pesquisa dessa contextualização, uma visita à Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) também foi realizada, durante a qual foram tiradas dúvidas sobre a atuação e critérios da PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) pelos engenheiros responsáveis pela Gestão de Resíduos e Logística Reversa no estado de São Paulo.

Sobre a contextualização do aço (linha branca – compressores herméticos) (c), foi realizada uma visita ao escritório da unidade de negócios fabril de compressores herméticos, onde foi realizada uma entrevista com o Gerente Geral responsável pela operação e posteriormente uma visita à instalação fabril, a fim de se conhecer a operação da unidade de negócios da empresa e se levantar dados primários. Os dados de custos de componentes e peças foram levantados através dos principais distribuidores de compressores herméticos e peças para refrigeração no Brasil (dados secundários). O Quadro 3 representa o perfil dos entrevistados para cada contextualização.

Quadro 3 – Perfil dos entrevistados para cada contextualização

Produto	Setor	Stakeholder	Contato
Lata Alimentícia	Embalagens	Usina de Alumínio	Gerente de Negócios
		Indústria Alimentícia	Diretor Industrial
			Gerente Comercial
Impressora	Eletrônicos	Marca de Eletrônico	Gerente Operacional de Sustentabilidade
			Profissional da Operação de Sustentabilidade
		Fabricante OEM	Departamento de Comunicação
		Gestor de Resíduos	Engenheiros (Líderes) de Processo
		CETESB	Engenheiro de Gestão de Resíduos Gerente de Engenharia de Logística Reversa
Compressor Hermético	Linha Branca	Fábrica de Compressores	Gerente Geral
		Gestor de Resíduos	
		Distribuidores de Compressores e Peças de Refrigeração	Gerentes Comerciais
		Assistência Técnica	Técnicos Responsáveis

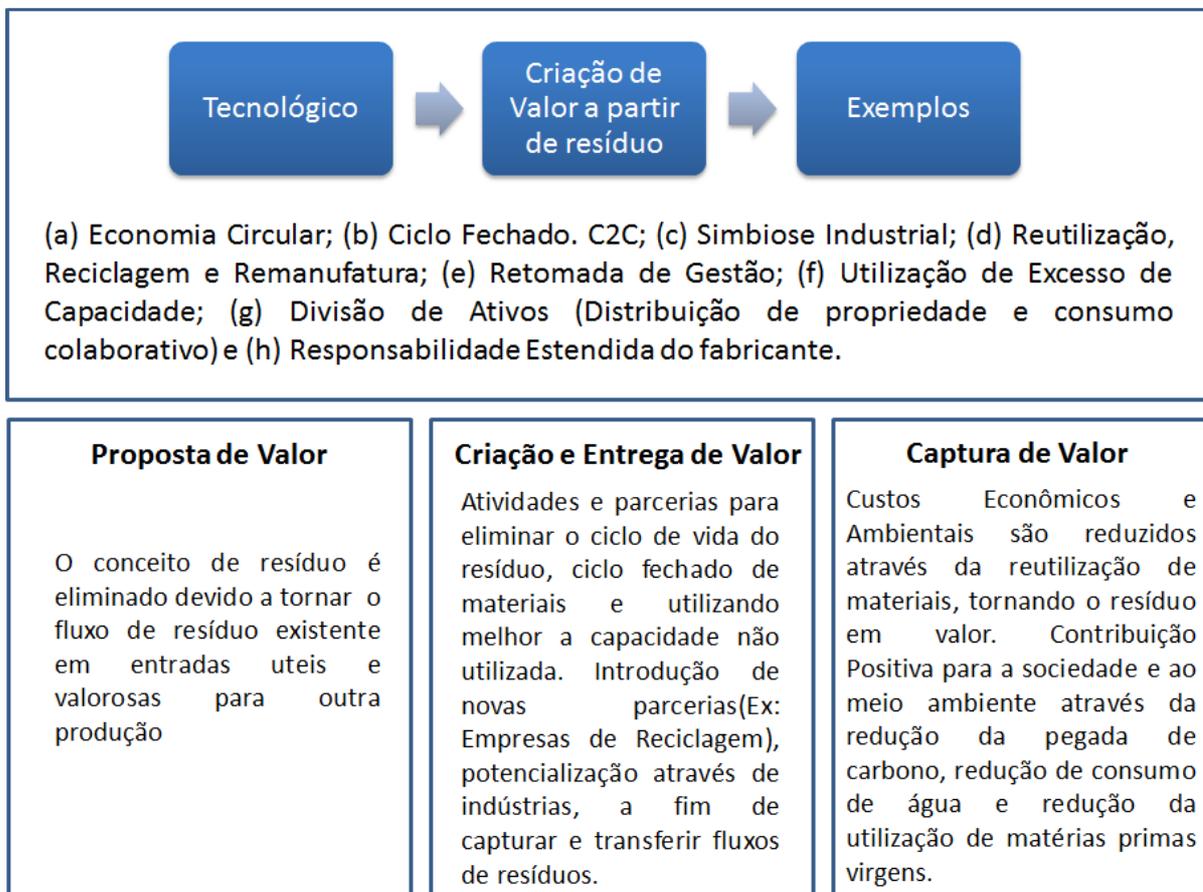
Fonte: Autor

### 3.2 CRITÉRIO DE ESCOLHA DOS MODELOS DE NEGÓCIO

Os modelos de negócios foram escolhidos de acordo com os princípios e características da Economia Circular para promover a criação de valor, conforme discutido pela Fundação Ellen MacArthur (2016), a definição proposta por Kirchherr et al. (2017) e arquétipos de modelos de negócios sustentáveis discutidos por Bocken et al. (2014).

Bocken et al (2014) desenvolvem arquétipos baseados em uma revisão de literatura e pela prática de modelos de negócio. Seus modelos de negócios são agrupados nos principais tipos de modelos inovadores de sustentabilidade; (i) tecnológico; (ii) social; e (iii) organizacional. As estratégias de EC estão agrupados no pilar tecnológico, dentro do arquétipo de “Criação de Valor a partir de resíduos”. A Figura 6 demonstra a classificação do arquétipo sustentável por Bocken et al. (2014).

Figura 6 – Arquétipos Sustentáveis de Bocken



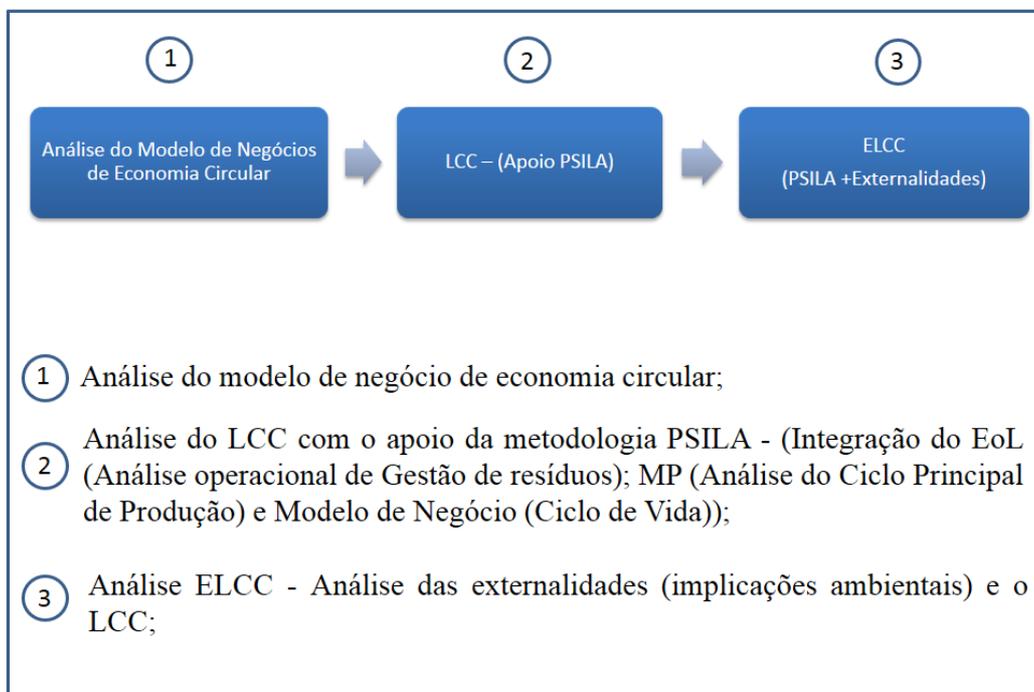
Fonte: Autor adaptado de Bocken et al, 2014 p.48

### 3.3 PROTOCOLO DE PESQUISA

Foi elaborado um protocolo de pesquisa para o apoio das visitas em campo e desenvolvimento das análises dos modelos de negócio. Yin (2010) relata que é indispensável elaborar um protocolo para o estudo com a finalidade de estabelecer a relação do pesquisador com o ambiente a ser pesquisado. O protocolo é mais que um instrumento, pois contém os procedimentos e regras que deverão ser seguidos para o desenvolvimento do estudo. De acordo com Eisenhart (1989), o protocolo do estudo deve ser criado após definidas as questões da pesquisa, os objetivos e a seleção dos casos.

O protocolo de pesquisa foi elaborado conforme os objetivos pré-estabelecidos do trabalho, com a finalidade de se cobrir as lacunas de pesquisas apoiadas pela fundamentação teórica. O protocolo de pesquisa foi elaborado em 3 etapas: (1) análise do modelo de negócio circular; (2) análise do LCC (apoiado pela PSILA); e (3) análise do ELCC (combinação do LCC com as externalidades). A Figura 7 representa a estruturação do protocolo de pesquisa.

Figura 7- Etapas do Protocolo de Pesquisa de Campo

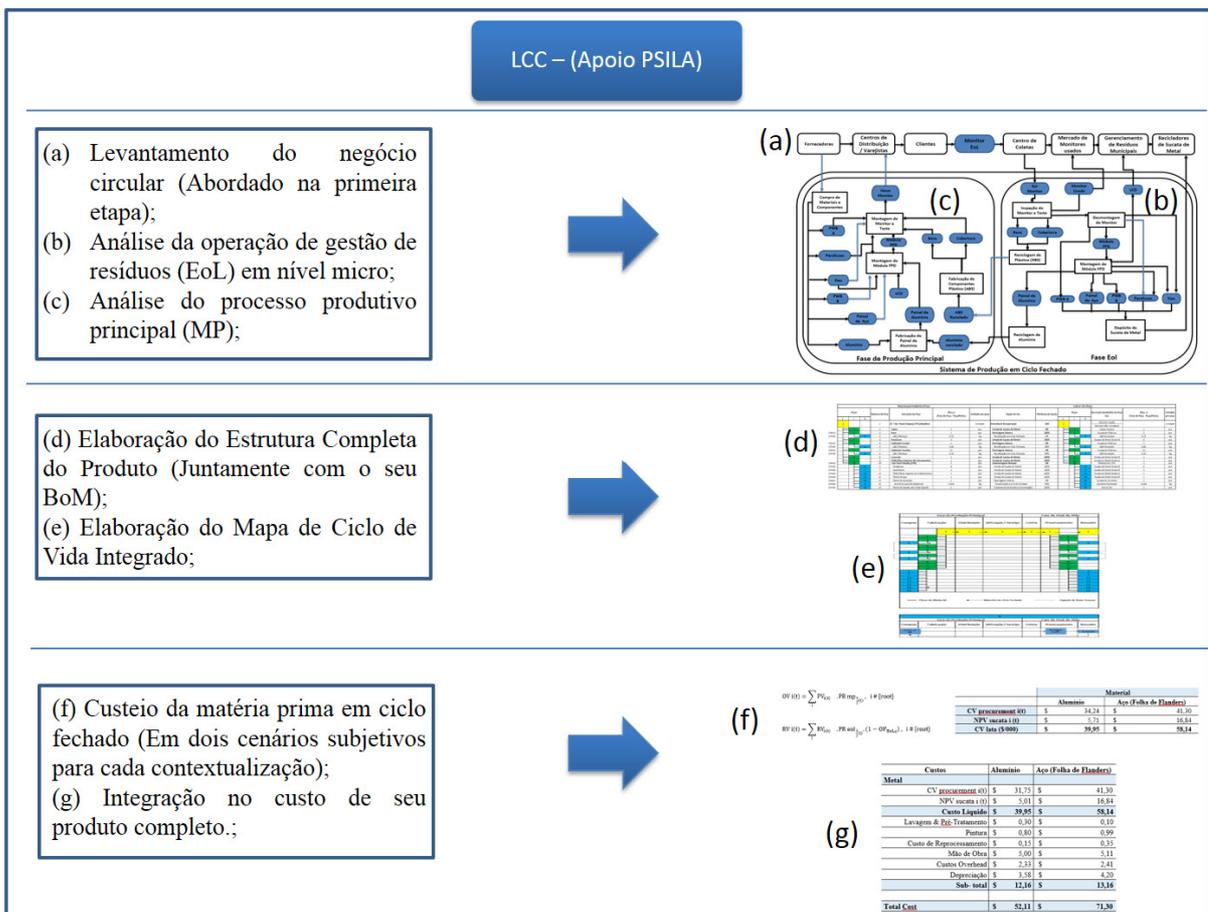


Fonte: Autor

A primeira etapa (1) consiste na análise do modelo de negócio circular a nível macro. Nessa etapa será analisado o modelo de negócio para cada contextualização, descrevendo a

função de todos os atores envolvidos (*stakeholders*) e sua operacionalização de economia circular (gestão de resíduos). A segunda etapa (2), conforme abordado na fundamentação teórica e na Figura 7; será realizada a análise do LCC, apoiado pela ferramenta PSILA. Para a elaboração dessa ferramenta, será necessária, além do (a) Levantamento do Negócio Circular (abordado na primeira etapa), (b) a Análise da Operação de Gestão de Resíduos (EoL) em nível micro; e a (c) Análise do Processo Produtivo Principal (MP). Após esse levantamento, será necessária a (d) Elaboração do Estrutura Completa do Produto (juntamente com o seu BoM) e a (e) Elaboração do Mapa de Ciclo de Vida Integrado. Após o levantamento e elaboração desses itens, será realizado (f) o Custeio da Matéria Prima em Ciclo Fechado (em dois cenários subjetivos para cada contextualização) e a (h) Integração no Custo de seu Produto Completo. Devido aos vários desdobramentos dessa etapa, a Figura 8 demonstra sua estruturação no desenvolvimento da segunda parte no protocolo de pesquisa.

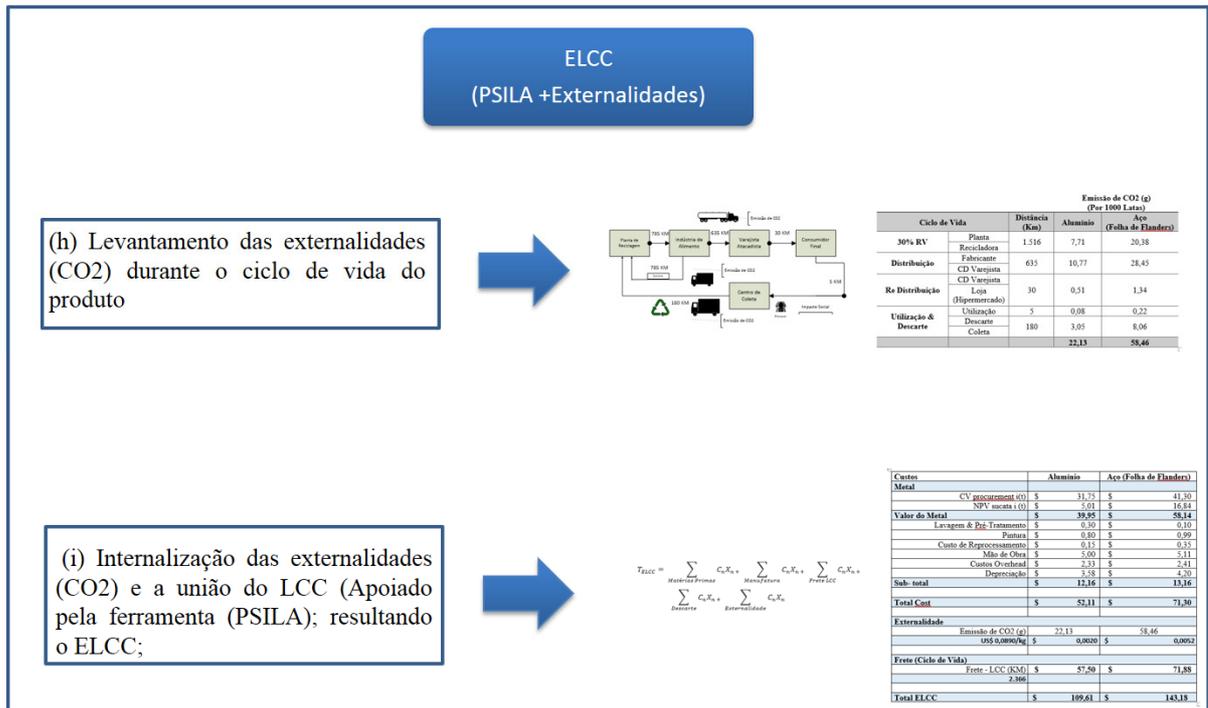
Figura 8 - Desenvolvimento do LCC (Apoiado pela Ferramenta PSILA)



Fonte: Autor

A terceira etapa (3) consiste no (h) levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto, (i) sua internalização e a união do LCC, com a finalidade do cálculo do ELCC. Devido a essa etapa conter alguns desdobramentos específicos, a Figura 8 demonstra sua estruturação no desenvolvimento da terceira parte no protocolo de pesquisa.

Figura 9 - Desenvolvimento do ELCC



## 4. MODELOS DE NEGÓCIO ANALISADOS

Dentro dos modelos analisados, conforme os arquétipos previamente abordados; essa seção abordará o desenvolvimento das contextualizações dos modelos de negócio de (i) embalagens alimentícias, (ii) eletrônicos e (iii) linha branca, conforme estruturado no protocolo de pesquisa.

### 4.1. EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS

Nessa contextualização de latas alimentícias serão abordadas a (i) análise do negócio circular, a (ii) análise LCC e (iii) a análise ELCC, conforme previamente abordado no desenvolvimento do protocolo de pesquisa.

#### 4.1.1 Análise do Negócio Circular

No ramo de negócios de embalagens alimentícias; uma grande parte dos fabricantes de alimentos na América do Sul, América do Norte, Europa e Ásia possui sua produção de lata integrada ao seu processo produtivo, ou seja, numa cadeia vertical de fornecimento de embalagens. De acordo com a pesquisa respondida pelos *stakeholders*, isso se deve a dois fatores: (i) custo e (ii) qualidade. O fator de custo (i) é crítico, pois o custo da embalagem metálica representa uma parcela significativa no custo total do produto alimentício. Referente ao fator qualidade (ii), a embalagem metálica, além de prover segurança ao alimento durante o processo logístico, ajuda na conservação e garantia de qualidade do alimento por um determinado período de tempo.

O alumínio e o aço são empregados em uma ampla gama de aplicações de embalagens (desde latas de bebidas até recipientes para alimentos, garrafas, tubos e aerossóis). Devido às características de consumo e características do metal, o fabricante (fornecedor) do material metálico (usina de alumínio ou siderúrgica) coleta a embalagem em seu ciclo final de vida. Esse fator se dá por três pontos: (i) a matéria prima metálica pode ser reciclada infinitamente e não perde sua característica mecânica e química durante o processo industrialização (reciclagem); (ii) o processo de reciclagem do metal gera grandes vantagens econômicas e ambientais ao fabricante ou transformador de matéria-prima; e (iii) como o alimento enlatado é um bem de

consumo não durável, ou seja, possui um pequeno de ciclo de vida, a administração do resíduo é criticamente necessária devido à grande quantidade de consumo no mercado, a fim de não gerar um impacto ambiental.

Devido a essas razões, durante a pesquisa da contextualização foram levantados dados referentes aos postos de coletas da usina de alumínio. A usina de alumínio possui 7 postos principais de coleta espalhados em diversas regiões do Brasil, trabalhando em parceria com uma grande quantidade de pequenos postos independentes de coleta. Ainda, além da coleta dos resíduos gerados pelos consumidores; a usina de alumínio consegue prestar o serviço de transformação a seus clientes (processamento da sucata interna gerada no processo em uma nova matéria prima; ou seja, bobina laminada de alumínio).

Referente aos benefícios ambientais, a reciclagem do alumínio beneficia em 70% as emissões de CO<sub>2</sub> e em 71% o consumo de energia, quando comparada à produção de latas com apenas alumínio primário, que é obtido a partir de extração da bauxita (ABAL, 2017). No caso do alumínio para a lata de bebida, o índice de retorno da reciclagem chega a níveis de 97% (ABAL, 2015). A manutenção do índice próximo aos 100% de reciclagem é uma demonstração de que esse modelo é referência para a construção da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PRNS) e serve de exemplo para uma economia de baixo carbono, com geração simultânea de emprego e renda, conforme os objetivos que se pretendem atingir na COP-21 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015), em Paris (ABRALATAS, 2017). Segundo a Associação de Alumínio Europeia (2018), o potencial de aquecimento global (emissões de gases com efeito de estufa expressas em equivalente CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>e) do alumínio pode ser demonstrado com os dados descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Emissões de gases com efeito de estufa expressas em equivalente CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>e (Alumínio)

<b>Configurações de Dados (Alumínio utilizado na Europa)</b>	<b>kgkg de CO<sub>2</sub> por kg de produção</b>
Alumínio Primário produzido na Europa ( <i>Cradle to Grave</i> )	6,7
Alumínio Primário utilizado na Europa ( <i>Cradle to Grave</i> )	8,6
Produção de Chapas	0,4
Produção de Extrudados	0,7
Produção de Folhas	1,3
Produção de Fundidos	0,3
Produção de Refinos (Bauxita)	0,5

Fonte: Autor adaptado de Associação de Alumínio Europeia, 2018 p.3

Referente à contribuição social, a reciclagem do alumínio colabora para o crescimento da consciência ecológica na comunidade, proporciona uma menor agressão ao meio ambiente, incentiva a reciclagem de outros materiais, promove o aumento de renda em áreas carentes pelo incentivo à coleta de resíduos e beneficia entidades assistenciais como igrejas e escolas (ABAL, 2015).

Através da pesquisa, foi possível levantar todos os dados para o mapeamento do modelo de negócios para embalagens de alumínio para a indústria alimentícia. A cadeia de fornecimento do modelo terá os seguintes “*stakeholders*” e suas respectivas responsabilidades na cadeia:

a) Usina de alumínio

- Responsável pela fundição e laminação do alumínio;
- Responsável pela reciclagem das latas e sucatas de toda a cadeia;
- Responsável pela coleta (postos de coletas espalhados em todos o país) e gestão do resíduo na cadeia (coletas de sucatas industriais na cadeia de distribuição);

b) Empresa alimentícia

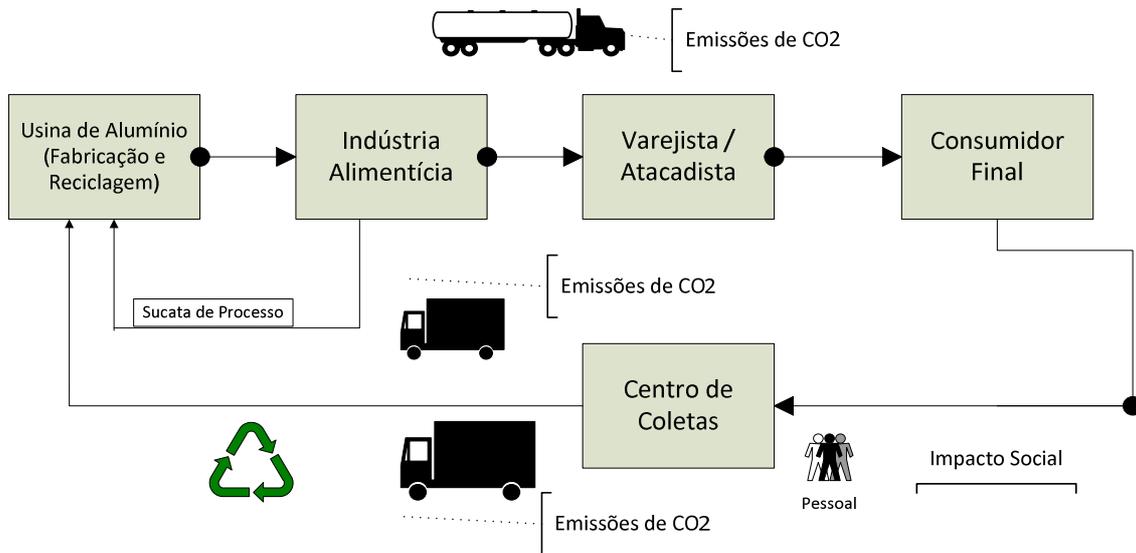
- Responsável pelo processamento do alimento;
- Responsável pela fabricação das latas;
- Responsável pelo envase dos alimentos;
- Responsável pela operação logística de seu produto aos varejistas e atacadistas de alimentos;

c) Varejistas e atacadistas

- Responsável pela venda do produto ao consumidor final.

A estrutura da economia circular adotada pela usina e pela empresa alimentícia segue o modelo de identificação do estado da arte sobre modelos de negócio para os modelos comerciais circulares e sintetiza o desenvolvimento do modelo de negócio em modelo negócio circular da lata alimentícia de alumínio, conforme estruturado na Figura 10.

Figura 10 – Modelo de Negócio Circular da Lata de Alumínio de Alimentos



Fonte: Autor

#### 4.1.2 LCC

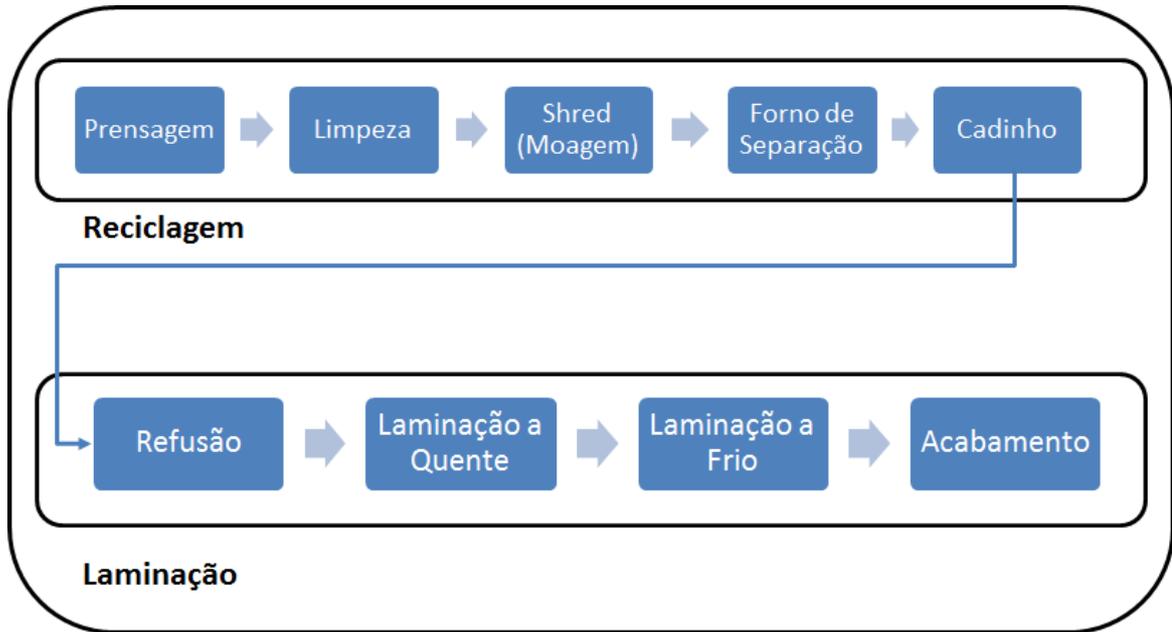
Essa seção abordará o desenvolvimento do LCC, apoiado pela ferramenta PSILA, integrando a análise de negócio, a fase EoL, a fase MP e o cálculo do custo.

##### 4.1.2.1 Gestão de Resíduos (EoL)

Referente à lata de alimento, conforme descrito na análise do negócio de modelo circular, devido às características do negócio, o resíduo da lata é gerido pela usina, pois a lata é descartada pelo consumidor ou em postos de coleta ou descartes de resíduos próprios e coletada por catadores e empresas responsáveis pela compra de sucatas, para ser posteriormente revendida à usina de alumínio.

O processo de coleta é realizado através de logística reversa pela usina de alumínio; através da coleta e transferência através de seus centros de coleta ou entrega direta na usina. Quando a sucata é entregue à usina, passa pelo processo de reciclagem e é inserida através de cadinhos (recipiente de metal em forma líquida) no processo de fabricação da chapa de alumínio (laminação). A Figura 11 demonstra o processo de reciclagem e fabricação do alumínio laminado para indústria alimentícia.

Figura 11 – Processo de reciclagem e laminação de alumínio

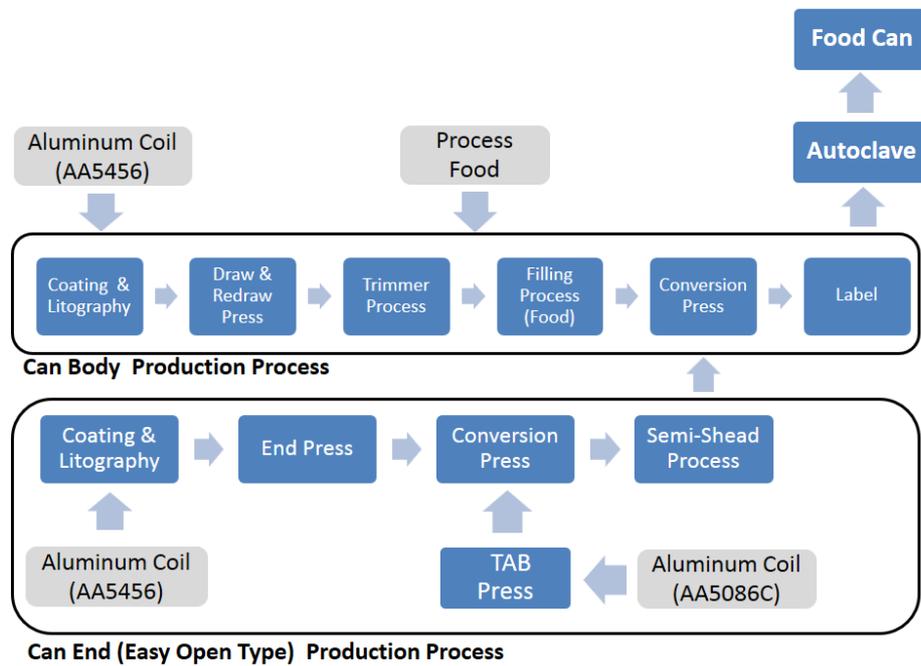


Fonte: Autor

#### 4.1.2.2 Processo principal de produção (MP)

Um ponto importante antes do entendimento do processo produtivo principal da lata de alumínio é o entendimento completo do fornecimento da matéria-prima em ciclo fechado. Para a lata de comida em seu processo produtivo, sua composição tem basicamente duas partes (corpo e tampa *easy open*), que são derivadas de três componentes (estrutura do corpo, estrutura da tampa e estrutura do anel). Para obtenção das três componentes, a indústria de alimento necessita obter três tipos específicos de bobinas de alumínios. Essas variações de especificações são referentes aos tipos de ligas e dimensões (espessura, largura, tamanho da bobina), definidas devido às especificações de maquinário (processo produtivo metalúrgico). Após a estampagem do corpo e da tampa, o alimento é envasado na lata e esse produto final é submetido a uma fase da produção chamada autoclave. O conjunto de todas essas etapas produtivas é chamado de fase de produção principal (*mainstream production phase*). Após essa fase, a lata é acondicionada em caixas “másters” para a proteção durante o transporte e distribuição do produto. Essas caixas são colocadas em páletes de madeiras e distribuídas aos clientes da indústria alimentícia como varejistas e atacadistas. A etapa produtiva principal (*mainstream production phase*) é demonstrada conforme a representação conceitual do sistema na Figura 12.

Figura 12 - Etapa Principais de Produção da embalagem alimentícia (“Mainstream Production Phase”)



Fonte: Autor

Com a finalidade de se entender detalhadamente o processo e identificar em quais etapas há a geração de sucata, a definição para cada etapa do processo produtivo encontra-se no Anexo A. Após esses dois processos; *Can Body & Can End Production Process*, obtem-se o alimento envasado na lata, porém há a necessidade de o produto ser submetido a um processo chamado autoclave, que submeterá o produto a um ambiente de alta pressão e alta temperatura. Os níveis de pressão e temperaturas seguem normas específicas da indústria alimentícia e são controlados durante esse processo. A finalidade desse processo é cozinhar os alimentos dentro da própria lata e esterilizar o produto eliminando micro-organismos, resíduos industriais e aumentar o período de validade do alimento.

Após analisar o processo do ciclo principal de produção alimento enlatado, segundo informações da indústria alimentícia, a geração total de sucata ou ineficiência do processo, durante a fase principal de produção está descrita na Tabela 2. Esses dados são muito importantes, pois permitirão modelar o custo da matéria-prima metálica do produto, ou seja, a lata produzida. Dependendo do tipo de alimento processado a ser envasado na lata, o custo da embalagem pode ser maior do que o próprio custo do alimento. Ou seja, a lata pode custar mais que o alimento processado. Esse retalho pode ser enviado para a própria usina de alumínio ou siderúrgica, a fim de reciclá-lo e utilizá-lo como matéria prima em seu processo produtivo, num

componente de ciclo fechado. Para uma visualização da lata fabricada no processo produtivo, a Figura 13 detalha o resultado de produção correspondente a cada peça da lata tanto para o alumínio quanto para o aço (Folha de Flandres).

Tabela 2 - Taxa de Geração de Sucata no Processo Produtivo

Geração de Sucata	Processo Produtivo	Peça (i)		
		Body (Caneco)	End (Tampa)	Tab (Anel)
	Estampagem (Prensas e Draw/Redraw)	X	X	X
	Trimmer (Corte de "Beiradas")	X		
	Coating & Litography	X	X	
<b>% Sucata (Ineficiência do Processo)</b>	<b>30%</b>	<b>30%</b>	<b>38%</b>	

Fonte: Autor

Figura 13 - Análise do resultado de produção para cada peça da lata

Peça	Material	Dimensional da Chapa			Peso da Chapa		Geração de Sucata (Press)		Estampagem Qty/Chapa	Peso por embalagem	
		Esp (mm)	L(mm)	C (mm)	Densidade de Material (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Chapa (Kgs)	(%)	kg		Kg	Gramas
Caneco	Alumínio	0,25	866,00	853,00	2,70	0,50	30%	0,15	30,00	0,01	11,62
	Aço (Folha de Flanders)	0,22	866,00	853,00	7,87	1,28	30%	0,38	30,00	0,03	29,84
Tampa	Alumínio	0,22	780,00	1.034,00	2,70	0,48	30%	0,14	72,00	0,00	4,65
	Aço (Folha de Flanders)	0,21	780,00	1.034,00	7,87	1,33	30%	0,40	72,00	0,01	12,96
Anel	Alumínio	0,46	96,01	37,00	2,70	0,00	38%	0,00	4,00	0,00	0,68
	Aço (Folha de Flanders)	0,46	96,01	37,00	7,87	0,01	38%	0,00	4,00	0,00	1,99

Fonte: Autor

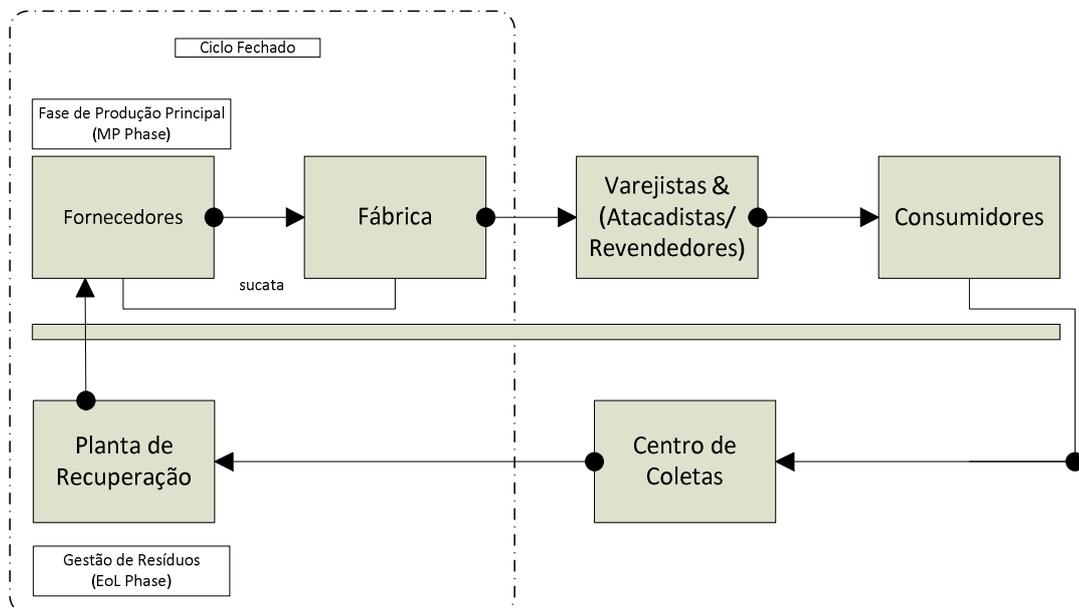
Para um melhor entendimento da Figura 13; durante o processo produtivo do corpo e da tampa, a chapa de alumínio ou aço entra na fase de pintura (recobrimento com vernizes de grade alimentícia, cuja a função é estabelecer uma barreira de proteção entre o metal e o alimento, ou seja, evitar o efeito de migração ou contaminação do metal no alimento, como citado anteriormente) e, após essa fase, o metal entra para a produção da peça no processo de conformação (prensa) e processos de acabamento posteriores, conforme representado na Figura 13.

Para cada chapa inserida no processo da prensa, há um número de formação de quantidades de peças; por exemplo, para o corpo da lata ou caneco, geram-se 30 peças para uma chapa de 0,25 mm de espessura, 866 mm de largura e 853 mm de comprimento. Após a

produção da lata, no processo produtivo de cada peça, gera-se uma porcentagem de sucata (o caneco, por exemplo, gera 30%). Conclui-se que para cada chapa de alumínio (peso de 0,5 kg) que entra no processo, são gerados 30 canecos de 11,62 gramas (0,01162 kg) e 0,15 kg de sucata no processo, por chapa. Baseando-se nesses resultados, obtêm-se dados para realizar os pedidos de produção e cálculo do custo de cada peça, como serão descritos posteriormente.

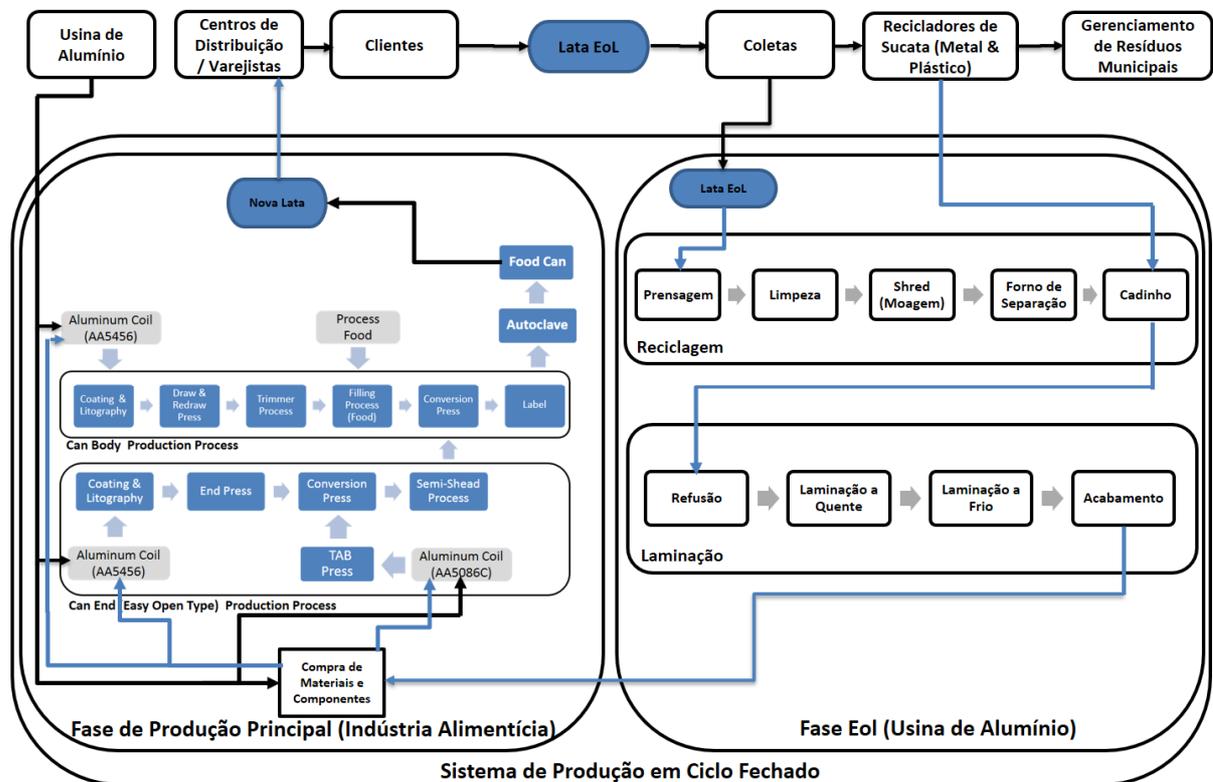
Após a análise da fase MP, conforme modelo teórico de Low et. al (2014), são necessárias duas análises: (i) a integração do modelo de negócio circular com a fase MP e a EoL; e (ii) a conceptualização do sistema em ciclo fechado. Essa análise é descrita nas figuras 11 e 12, respectivamente, concluindo a análise do processo produtivo e sua integração com o ciclo de vida. Observa-se que, para esse caso, não é analisado o ciclo de vida total da lata, somente o processo produtivo na indústria alimentícia, pois o grande gestor da sucata de alumínio é a usina de alumínio, e não a indústria alimentícia. A usina de alumínio, sendo gestora da sucata no final da vida do produto (EoL), tem um ganho operacional e financeiro com o resíduo da lata, conforme demonstrado na Figura 10, na representação da modelo de negócio da lata de alimento em alumínio. Baseando-se nessas análises, estrutura-se (figuras 14 e 15) a conceptualização do ciclo fechado da lata alimentícia (aço e alumínio).

Figura 14 - Sistema Conceitual de Ciclo Fechado para o Alimento Enlatado em Alumínio



Fonte: Autor

Figura 15 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para a lata de alumínio alimentícia.



Fonte: Autor

#### 4.1.2.3 Estruturação Completa da Informação do produto e Mapa de Ciclo de Vida do Produto

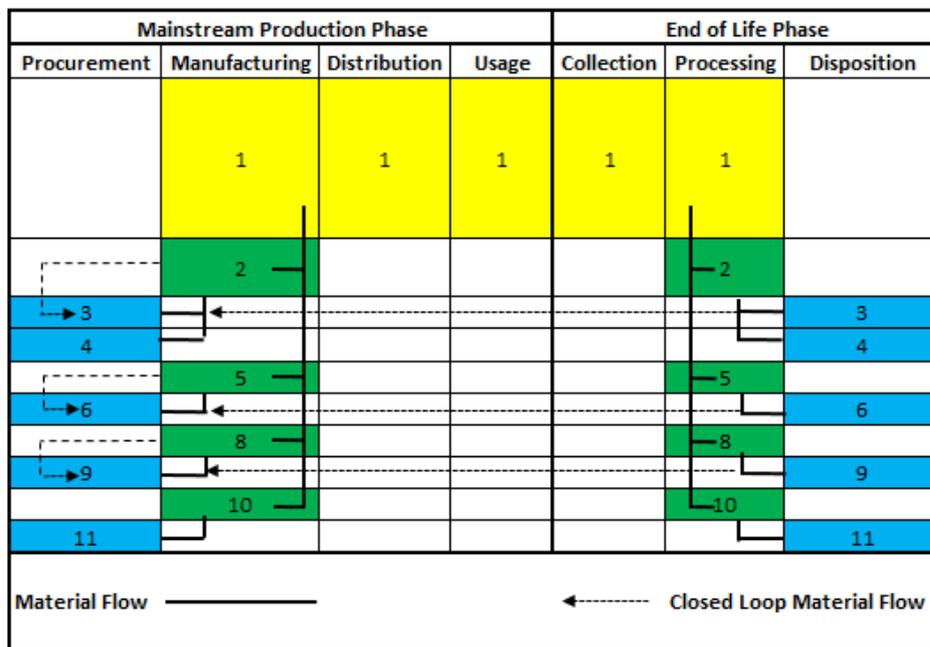
Baseando-se nas informações da revisão da literatura e nas informações descritas anteriormente no ciclo produtivo, tanto MP e EoL (figuras 14 e 15), pode-se montar a estruturação completa do produto (Figura 16) e o mapa do ciclo de vida (Figura 17). Conforme estruturado nas figuras 16 e 17, após elaboração dessas informações, cria-se a orientação para elaboração do custo direto de produção da matéria prima.

Figura 16 – Estruturação Completa da Informação do Produto para a Lata de Alimento Processado

Mainstream Production Phase															
Spare			Number	Description	PRmp (PR - Spare/Can)	Part Qty Unit	Internal Scrap Option		OF (Outgoing Fraction)	Spare			Qualitative Scrap Description	PREol (PR-Spare/Parte)	Part Qty Unit
j	i	k								j	i	k			
1			1	Food Can	-	Unit	RV - Recovering Volume	30%		1			-	Unit	
(Nest)		2	2	Can Body (Food Can)	1	pcs	External Recycling				2		Scrap Metal Grade A		
(Child)		3	3	Aluminum (AA5456)	0,01145	Kg	Close Loop Reutilization	98%			3		Aluminum Scrap	0,01145 Kg	
(Child)		4	4	Label	1	Unit	Waste Treatment (Disposal)	0%			4		Paper Scrap	0 Unit	
(Nest)		5	5	Can End (Food Can)	1	pcs	External Recycling				5		Scrap Metal Grade A		
(Child)		6	6	Aluminum (AA5456)	0,000460	Kg	Close Loop Reutilization	98%			6		Aluminum Scrap	0,000460 Kg	
(Nest)		8	8	Tab	1	pcs	External Recycling				8		Scrap Metal Grade A		
(Child)		9	9	Aluminum (AA5086)	0,00068	Kg	Close Loop Reutilization	98%			9		Aluminum Scrap	0,00068 Kg	
(Nest)		10	10	Processed Food	1	portion	Waste Treatment				10		Food Waste		
(Child)		11	11	(Tuna, Meat.....)	0,15	Kg	Waste Treatment (Disposal)	0%			11		Food Waste	0 Kg	

Fonte: Autor

Figura 17 - Mapa do Ciclo de Vida Integrado da Lata



Fonte: Autor

#### 4.1.2.4 Custeio da Matéria Prima em Ciclo Fechado e Integração no Custo Completo do Produto

Utilizando a teoria do PSLIA, primeiramente, deve-se determinar o volume de produção necessário para a fabricação da lata de alimento em ciclo fechado. Para isso, pode-se determinar

as fórmulas 23, 24, 25 e 26, baseando-se nas fórmulas da 4, 5, 6 e 7 da fundamentação teórica do PSILA.

$$PV = OV - RV \quad (23)$$

$$OV = OV_{i(t)} \cdot PR_{mp} \frac{k}{i}(t), \quad i \in \{\text{root} = j\} \quad (24)$$

$$RV = RV_{i(t-1)} \cdot PR_{eol} \frac{k}{i}(t-1) \cdot OF \cdot Bcl, \quad i \in \{\text{root} = j\} \quad (25)$$

$$Bcl, i = \begin{cases} 1, & \forall \in \{\text{ciclo fechado}\} \\ 0, & \forall \notin \{\text{ciclo fechado}\} \end{cases} \quad (26)$$

Onde:

- a) PV = Volume de compra de material (alumínio) da peça i;
- b) OV = Volume de produção por lata (j), tendo sua componente no tempo t;
- c) RV = Volume de peças (i) sucateadas para recuperação, tendo sua componente durante o tempo t-1;
- d) PR<sub>mp</sub> = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por lata (j) no tempo t;
- e) PR<sub>eol</sub> = Volume de material (k) da peça (i) por lata (j) gerado durante a fase de produção no tempo t-1;
- f) OF = Perda fracionária do material k;
- g) Bcl = Variável binária, onde 1 a peça (i) está em ciclo fechado e 0 a peça não está em ciclo fechado.

O único elemento que retorna em ciclo fechado é o alumínio ou a Folha de Flandres utilizados para a fabricação do corpo, da tampa e do anel da lata. Como citado anteriormente e analisado pelo diagrama e pelo sistema completo de informação de produto, durante o processo de produção da lata (no “*mainstream production phase*” ou “processo principal de produção do alimento” enlatado) é gerado 30% de sucata de alumínio. Quando a sucata retorna à usina de alumínio ou siderúrgica, há uma perda de 2%, ou seja, um retorno de 98% da sucata coletada durante o processo produtivo (OF). Esses valores de recuperação são similares para o aço e para o alumínio. Outro ponto importante é que os materiais em ciclo fechado são oriundos de um período anterior (neste caso, o período de estudo temporal é mensal). Isso se deve ao período necessário de processamento da sucata pela usina de alumínio ou siderurgia, que é de 1 mês, ou 30 dias, de produção (t-1).

Para se exemplificar uma aplicação do modelo matemático descrito anteriormente, pode-se considerar uma produção 2.100.000 unidades do corpo, por exemplo, durante o mês atual ou período t. Para esse caso, caso haja material processado anteriormente em ciclo fechado – produção do mês anterior (t-1) é de 2.100.000 unidades e RV 30% – 630.000 unidades de volume de sucata, conforme demonstrado na Figura 14; considera-se para cada corpo (i) da lata (j), o peso de 0,01145 kg (PR mp k/i) e a sucata gerada por cada corpo (i) por lata (j), como RV i x PR eol k/i. Considerando essas premissas, obtém-se o seguinte resultado:

$$PV_i(t) = 2.100.00 \times 0,01145 (OV) - 630.000 \times 0,01145 \times 98\% \times 1(RV)$$

$$PV_i(t) = \mathbf{16.976 \text{ kg ou } 16,97 \text{ toneladas}}$$

O segundo passo é o dimensionamento do custo variável direto da matéria prima metálica em ciclo fechado. Na revisão da bibliografia, Low et. al 2014 descrevem que os custos variáveis totais de um material em ciclo fechado são a somatória dos custos variáveis de *procurement*, ou compra de materiais, fabricação, distribuição, serviços, coleta, processamento e descarte/sucata. Nesse estudo de caso, será abordada somente a análise do custo de matéria-prima, que são as fases de *procurement*, ou compra de matéria-prima e descarte da sucata. Para essas duas fases, pode-se estruturar as equações de acordo com a revisão da literatura, nas equações 27, 28, 29 e 30, conforme as equações 8, 12 e 18. Nota-se que a sucata é oriunda de um tempo anterior (t-1) ou do tempo de produção atual (t), sendo necessário contabilizá-la no custo da matéria prima em valor presente.

$$CV_{i(t)} = CV_{\text{procurement } i(t)} + NPV_{\text{sucata } i(t)} \quad (27)$$

Os custos de compra e de sucata podem ser representados nas equações 28 29 e 30:

$$CV_{\text{procurement } i(t)} = PV_{i(t)} \cdot PR_{mp} \frac{k}{i(t)} \cdot P_{\text{metal},k(t)} \quad (28)$$

Onde;

- OV = Volume de produção por peça (i) no tempo t;
- PR mp = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por lata (j) no tempo t;
- P metal = Preço de compra da matéria-prima metálica (chapa de alumínio ou Folha de Flandres - k) no tempo i(t).

$$NPV_{sucata,i(t)} = \frac{CV_{sucata,i(t-1)}}{(1-d)^t} \quad (29)$$

$$CV_{sucata,i(t-1)} = RV_{i(t-1)} \cdot PR_{eol, \frac{k}{i}(t-1)} \cdot OF \cdot P_{proces., k(t-1)} \quad (30)$$

Onde:

- a)  $RV$  = Volume de peças (i) sucateadas para recuperação durante o tempo t-1;
- b)  $PR_{eol}$  = Volume de material (k) da peça (i) por lata (j) gerado durante a fase de produção no tempo t-1;
- c)  $OF$  = Perda de fração (Ex. Al – fusão no forno da usina/siderúrgica) do material k;
- d)  $P_{proces}$  = Preço de transformação da sucata em matéria prima reutilizável (bobina ou chapa de alumínio) no tempo i (t-1) pela usina de alumínio ou siderúrgica;
- e)  $d$  = Custo financeiro do estoque da sucata.

Antes de se exemplificar os custos das peças (i) da lata (j) com as equações elaboradas anteriormente, é muito importante o entendimento da composição do custo da matéria prima laminada metálica (P metal). O custo do laminado metálico é composto por duas variáveis: custo do metal e o seu custo de transformação. O custo do metal é o custo da matéria prima em sua forma pura, que geralmente no alumínio é adquirido pela usina em forma de lingotes, e no caso do aço, transformado pela própria siderúrgica em lingotes. O lingotamento é transformação do minério de ferro (magnetita) ou alumínio (bauxita) através de um processo químico como calcinação, Hall-Herout e Bayer (Dados levantados durante a pesquisa em campo), em barras metálicas com altos níveis de pureza do metal. O custo de transformação é o custo de processamento do material em lingotes em três etapas; (i) refusão; (ii) laminação; e (iii) corte. No processo de (i) refusão, os lingotes são inseridos em fornos, que realizam a purificação e a adição de elementos anteliga, a fim de se aumentar a resistência mecânica para uma determinada aplicação requisitada pelo cliente. Após a operação de refusão, o material é transformado em placas e encaminhado para o processo de laminação. O processo de laminação (ii) é um processo de redução mecânica da placa com alta espessura para uma bobina com baixa espessura. Na operação de corte (iii) ou acabamento haverá a customização da bobina de acordo com o dimensional requisitado pelo cliente.

Para a operação de reciclagem em ciclo fechado, o fabricante alimentício envia a sucata metálica para a usina ou para a siderúrgica e somente terá o custo de transformação da sucata de metal em bobina. Porém no processo de reciclagem existe uma perda de fusão, denominada

no modelo matemático como OF (*outgoing fraction*), que será necessário contabilizar para dimensionar a quantidade de produção e o custo da lata.

No caso do custo do metal, ele é classificado como uma *commodity* no mercado internacional e geralmente definido por indexações em bolsas de mercado futuro. Segundo o CRU (2017) e o Metal Bulletin (2017), a determinação do preço do alumínio se dá pelo índice de LME (*London Metal Exchange*) e um Prêmio Regional, que é o MWP (*Middle West Premium*). Durante a realização da pesquisa, os níveis de preço dos índices estavam com os valores de US\$ 1.650,00 (LME) e US\$ 110,00 (MWP). Ainda segundo o CRU (2017) e o Metal Bulletin (2017), o custo do minério de ferro também é composto por um índice regional de minério, no caso do estudo é o IOCJ e um prêmio regional, que são US\$ 78,41 e US\$ 77,84, respectivamente. Referente ao custo de transformação, através de uma pesquisa de mercado realizado pelo relatório do CRU (2017), os custos de transformação para as ligas de alumínio para aplicação em latas de comidas foram US\$ 1.100,00 por tonelada, ou US\$ 1,10 por quilo, e para o aço (Folha de Flandres) o preço foi de US\$ 1.229,00 por tonelada, ou US\$ 1,29 por quilo, aproximadamente.

Após a descrição dos custos da matéria prima metálica, durante a continuidade das análises das equações de custo para a embalagem alimentícia, juntamente com sua análise em ciclo fechado, indicarão uma conclusão objetiva do primeiro benefício da inovação, o custo direto. Para se iniciar a análise, será considerada uma produção de 1.000 latas para o tempo  $t$  (mês atual) e uma produção para o tempo anterior ( $t-1$ ) de 1.000 latas, afim de visualizar o benefício da utilização do material em ciclo fechado para ambos materiais, conforme demonstrado nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Peso de peça (i) por lata (j)

Peça	Material	Peso por embalagem	
		Kg	G
Caneco	Alumínio	0,0116	11,62
	Aço (Folha de Flandres)	0,0298	29,84
Tampa	Alumínio	0,0047	4,65
	Aço (Folha de Flandres)	0,0130	12,96
Anel	Alumínio	0,0007	0,68
	Aço (Folha de Flandres)	0,0020	1,99

Peso por lata (kg)*	Material	
	Alumínio	Aço (Folha de Flandres)
PR mp k/i (t) (kg)	0,01696	0,04480
PR eol k/i (t-1) (kg)		

\* Caneco + Tampa + Anel

Fonte: Autor

Tabela 4 - Produção  $OV_i(t)$  e  $RV_i(t-1)$  para uma  $PV_i(t)$  (produção) de 1.000 latas – Aplicação das fórmulas 23, 24 e 25.

	Material	
	Alumínio	Aço (Folha de Flandres)
$PV_i(t)$	1.000	1.000
RV	30%	30%
$PV_i(t-1)$	1.000	1.000
OF	98%	98%
$RV_i(t-1)$	294	294
$OV_i(t)$	706	706

Fonte: Autor

É importante salientar que, para simplificar o cálculo, (a) foi considerada a somatória de  $PR_{mp} k/i$  e  $PR_{eol} k/i$  para os materiais metálicos (k) das peças (i) como o corpo, tampa e anel, pois ambos materiais k (alumínio e Folha de flandres) possuem o mesmo OF,  $P_{metal}$ . e  $P_{transf}$ , e (2) a unidade de medida dos materiais metálicos será referenciada em quilos.

A próxima etapa de cálculo é a definição dos custos da matéria prima metálica e os custos de processamento de sucata ou metal para cada material ( $P$  process  $k$ ), conforme citado anteriormente e mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Custo ou Preço dos Materiais Metálicos ( $k$ ).

Bobina de Alumínio AA5xxx para Lata		
LME (\$/kg)	\$	1,65
MWP (\$/kg)	\$	0,11
P proces $k$ (t) (\$/kg)	\$	1,10
P metal $k$ (t) (\$/kg)	\$	<b>2,86</b>

Bobina de Aço (Folha de Flandres) para Lata		
Custo do Metal (\$/kg)	\$	0,778
P proces $k$ (t) (\$/kg)	\$	1,241
P metal $k$ (t) (\$/kg)	\$	<b>1,306</b>

Fonte: Autor

A partir das análises dos quadros acima, obtém-se o valor das variáveis para o cálculo dos custos, conforme demonstrado nos resultados nas tabelas 6, 7 e 8. Dois pontos importantes são: (1) a variável  $P$  proces  $k$  (t) será considerada igual ao seu período anterior ( $t-1$ ), pois no período da pesquisa realizada, seus valores eram idênticos; e (2) o custo financeiro  $d$  é de 1,98% a.m. ou ao período  $t$  ( $t =$  mês) para atualização do custo em valor presente.

Tabela 6 - Custo de Aquisição de Material – CV procurement  $i(t)$  – Fórmula 28

	Material	
	Alumínio	Aço (Folha de Flandres)
OV $i(t)$	706	706
PR mp $k/i$ (t) (kg)	0,01696	0,04480
P metal	\$ 2,86	\$ 1,31
CV procurement $i(t)$	\$ <b>34,24</b>	\$ <b>41,30</b>

Fonte: Autor

Tabela 7 - Custo de Aquisição de Material – CV sucata i(t-1) – Fórmula 30 & NPV Sucata – Fórmula 29

	<b>Material</b>	
	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>RV i(t-1)</b>	<b>294</b>	<b>294</b>
<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	0,01696	0,04480
<b>P process</b>	\$ 1,10	\$ 1,23
<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>\$ 5,48</b>	<b>\$ 16,18</b>
	<b>Material</b>	
	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>C sucata i(t-1)</b>	5,48	16,18
<b>D</b>	1,98%	1,98%
<b>T</b>	2,00	2,00
<b>NPV sucata i (t)</b>	<b>\$ 5,71</b>	<b>\$ 16,84</b>

Fonte: Autor

Tabela 8 - Custo Variável do Material – CV lata (j(t)) – Fórmula 27

	<b>Material</b>	
	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>CV procurement i(t)</b>	\$ 34,24	\$ 41,30
<b>NPV sucata i (t)</b>	\$ 5,71	\$ 16,84
<b>CV lata (\$/000)</b>	<b>\$ 39,95</b>	<b>\$ 58,14</b>

Fonte: Autor

Considerando esse modelo matemático juntamente com as premissas levantadas anteriormente, obtém-se que o custo de matéria-prima metálica da embalagem em Folha de Flandres é 32% maior (US\$ 58,14 > US\$ 39,95) quando comparado ao custo de matéria-prima metálica da embalagem em alumínio, e também há uma maior necessidade de desembolso financeiro durante o fluxo de caixa pela indústria alimentícia para a compra de matéria-prima. Adicionando outros custos variáveis e fixos, o custo total da lata é representado na Tabela 9.

Tabela 9 - Custo total da lata (j)

<b>Custos</b>	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>Metal</b>		
CV procurement i(t)	\$ 31,75	\$ 41,30
NPV sucata i (t)	\$ 5,01	\$ 16,84
<b>Custo Líquido</b>	<b>\$ 39,95</b>	<b>\$ 58,14</b>
Lavagem & Pré-Tratamento	\$ 0,30	\$ 0,10
Pintura	\$ 0,80	\$ 0,99
Custo de Reprocessamento	\$ 0,15	\$ 0,35
Mão de Obra	\$ 5,00	\$ 5,11
Custos Overhead	\$ 2,33	\$ 2,41
Depreciação	\$ 3,58	\$ 4,20
<b>Sub- total</b>	<b>\$ 12,16</b>	<b>\$ 13,16</b>
<b>Total Cost</b>	<b>\$ 52,11</b>	<b>\$ 71,30</b>

Fonte: Autor

#### 4.1.3 ELCC

Essa parte da contextualização será o cálculo do ELCC, que será internalizado às externalidades ao longo do ciclo de vida, juntamente com o seu cálculo LCC

##### 4.1.3.1 Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto

Antes de iniciar as análises das externalidades com a combinação da ferramenta PSILA, é importante destacar um ponto subjetivo nessa contextualização: haverá diferença na emissão de CO<sub>2</sub> e no custo de frete de acordo com a utilização da matéria prima metálica, ou seja, alumínio ou folha de Flandres (aço). A característica do metal não ferroso, o alumínio, é que ele possui uma das menores densidades entre os materiais metálicos, por isso sua utilização como matéria-prima pode trazer benefícios ergonômicos e econômicos para a operação, tanto na distribuição e fabricação do produto, respectivamente. De acordo com pesquisas realizadas e simulações de custos de processo de embalagem apresentados na Tabela 2, pode-se utilizar o modelo comparativo apresentado na Tabela 10, a fim de analisar a diferença de peso na embalagem alimentícia utilizada nesse estudo de caso. Nota-se que a tampa é a soma das peças i – tampa e anel –, conforme demonstrado na Figura 12.

Tabela 10 - Diferença de peso de uma embalagem de alimento em Alumínio e Aço.

<b>Peso da Embalagem (g)</b>			
<b>Embalagem</b>	<b>Embalagem Alumínio</b>	<b>Embalagem Aço</b>	<b>Diferença de peso de i (g)</b>
Caneco	11,65	29,84	18,19
Tampa	5,34	14,95	9,01
			<b>27,20</b>

Fonte: Autor

De acordo com a pesquisa realizada na empresa alimentícia, a capacidade de carga em um caminhão, utilizando o máximo grau de sua capacidade de carga, é de 50.000 latas. Se essa capacidade for multiplicada por cada tipo de embalagem da Tabela 8 e compará-las, teríamos uma redução de 1.360 kg na utilização da embalagem de alumínio no transporte, aumentando 16 % a eficiência de carga no transporte (Tabela 11).

Tabela 11 - Economia de Peso no Transporte utilizando o material alumínio

<b>Embalagens por caminhão</b>	<b>Total de Redução de Peso - Carga – Kg</b>
<b>50.000</b>	<b>1.360,00</b>

Fonte: Autor

Segundo a ABAL (2015), para a redução de peso em transportes, a cada 100 kg há uma redução de 0.4 l de combustível por 100 km. Segundo dados técnicos dos caminhões da Volkswagen, a vida útil média de um caminhão é de 500.000 km. Considerando o custo do combustível diesel (US\$ 0,72/l), no período da elaboração do estudo de caso (PETROBRÁS, 2016), é possível estabelecer a economia de custo em combustível durante a vida útil do caminhão (Tabela 12).

Tabela 12 - Economia de Combustível

<b>Economia de combustível (Lts) - 100km</b>	<b>Economia na Vida útil do veículo (Lts)</b>
5,44 (*)	27.200
<b>Preço do Diesel Médio (US\$)</b>	<b>Economia na vida útil do veículo (US\$)</b>
0,72	\$ 19.584,00

(\*)56ml / km (0,00592l/km)

Fonte: Autor

Esse método permite estabelecer comparações entre elementos de custos durante as fases da vida útil de um produto. Assim, o usuário pode, por exemplo, optar por um custo inicial mais alto, a fim de ter menores custos de manutenção no futuro. O custeio no ciclo de vida também é necessário quando são tomadas decisões a respeito de custos de operação e manutenção durante a vida útil de um produto. Utilizando esse conceito, é possível modelar o custo de ciclo de vida do ativo logístico. Com base no modelo apresentado por Yosef (YOSEF S SHERIFO, 1980) e relacionando o modelo como uma elaboração de base heurística, dimensiona-se o custo de ciclo de vida do ativo logístico.

Custo Total do Ciclo =  $C_{aq} + C_{op} + C_m + C_{rev/desc} - V. \text{ venda (ativo)}$ ;

Onde:

- a)  $C_{aq}$  = Custo de aquisição do caminhão
- b)  $C_{op}$  = Custo operacional (combustível) do caminhão
- c)  $C_m$  = Custo de manutenção do caminhão
- d)  $C_{rev/desc}$  = Custo de revenda do caminhão (deprec.)
- e)  $V. \text{ Venda (ativo)}$  = Valor de venda residual do caminhão ou peças no final do ciclo de vida.

Segundo a ABAL (2015), a diminuição de peso de operação no sistema leva não só à eficiência de carga, mas também à melhoria dos custos de manutenção das peças. Esse ganho não foi quantificado, sendo uma variável a ser adicionada nos próximos estudos no modelo LCC.

Considerando o valor de aquisição de um veículo novo de 3,5 t (Volkswagen Constelion – PBT 3,5 t – US\$ 63.000,00), podemos considerar que, ao final da vida útil de uma frota 3 a 4 veículos, o benefício será quantificado na aquisição ou valor de um novo caminhão para a frota. Essa economia pode ser utilizada como um catalisador para o *payback* dos investimentos realizados pela indústria alimentícia, ao invés de um investimento para compra de novos ativos na frota.

A redução de peso, tanto em veículos comerciais como utilitários, é uma das principais estratégias para redução de emissão de poluentes. Quanto menor for o peso, menor a necessidade de o sistema mecânico realizar a combustão para movimento do veículo. Segundo a ABAL (2015), a cada 100 kg de redução de peso, há uma redução de aproximadamente 10 g de CO<sub>2</sub>, no percurso de 100 km (0,001 g de CO<sub>2</sub>/km). Utilizando essa premissa, é possível projetar a estimativa de redução de emissão de CO<sub>2</sub> na cadeia logística, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Cálculo da redução de Emissão de CO<sub>2</sub> conforme redução de carga do veículo

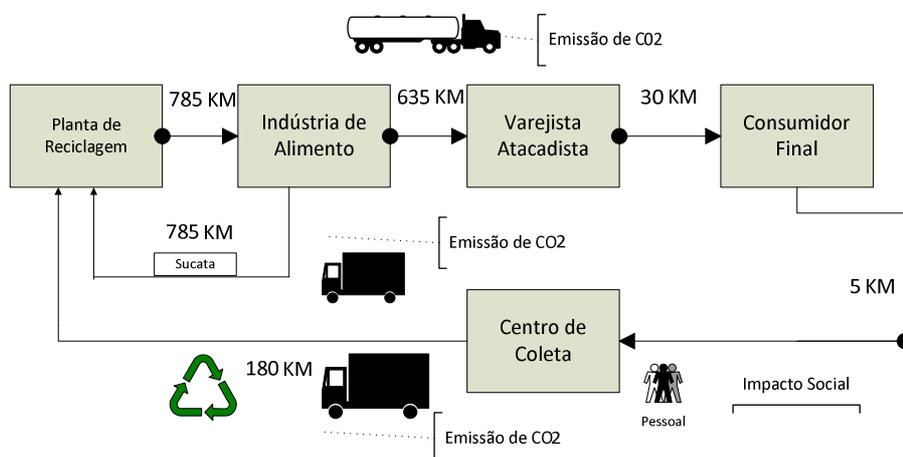
Redução de emissão de CO <sub>2</sub> (g/km)	Vida útil de um caminhão (Km)
1,360 (*)	500.000 km
Redução de CO <sub>2</sub> na vida útil (kg)	
680	

(\*) 0,001 g de CO<sub>2</sub>/km

Fonte: Autor

Além do benefício econômico, a redução de CO<sub>2</sub> agrega valor à estratégia de sustentabilidade da empresa, que beneficia o meio ambiente com a redução de emissão de CO<sub>2</sub>, agregando valor a sua operação e produto. Essa é a subjetividade da contextualização do modelo de embalagens metálicas, com o qual o fabricante poderá ter um ganho financeiro e a obtenção de um ganho referente à externalidade (emissão de Gases CO<sub>2</sub>).

Afim de se internalizar a externalidade para o cálculo do ELCC, o CO<sub>2</sub> e todo o ciclo de vida do produto será mostrado na Figura 18. Nota-se que nesse mapa, as externalidades estão sendo consideradas em todo o ciclo de vida do produto, juntamente com o RV (volume de sucata enviada ao processamento – 30% - RV), e na operação de distribuição e redistribuição dos varejistas, centro de distribuição para suas lojas, conforme demonstrado na Figura 18. Utilizando-se os dados realizados na pesquisa, foram coletadas as distâncias médias realizadas na operação da empresa, com o intuito de se calcular a emissão de CO<sub>2</sub> gerada durante o ciclo de vida da lata pela quantidade de 1000 latas.

Figura 18 - Análise do Ciclo de Vida da Lata - Emissões de CO<sub>2</sub>

Fonte: Autor

Tabela 14 - Análise de emissões de CO2 durante o ciclo de vida da lata

Externalidade	Alumínio	Aço (Folha de Flandres)
<b>Emissão de CO2 (g) - Por 1000 Latas</b>		
<b>Por 100 km</b>	1,696	4,480
<b>Por km</b>	0,017	0,045

Emissão de CO <sub>2</sub> (g) (Por 1000 Latas)				
Ciclo de Vida		Distância (Km)	Alumínio	Aço (Folha de Flandres)
<b>30% RV</b>	Planta	1.516	7,71	20,38
	Recicladora			
<b>Distribuição</b>	Fabricante	635	10,77	28,45
	CD Varejista			
<b>Re Distribuição</b>	CD Varejista	30	0,51	1,34
	Loja (Hipermercado)			
<b>Utilização &amp; Descarte</b>	Utilização	5	0,08	0,22
	Descarte	180	3,05	8,06
	Coleta			
			<b>22,13</b>	<b>58,46</b>

Fonte: Autor

#### 4.1.3.2 Internalização e a união do LCC

O próximo passo é internalizar a externalidade do CO<sub>2</sub> para o cálculo do ELCC. Na Europa, segundo o BNDES (2018), o Esquema Europeu de Comércio de Emissões (ETS), a emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada tem custo médio mensal de € 8,90 (janeiro de 2018 – taxa dólar – R\$ 3,20) (BACEN, 2018). Com o intuito de se internalizar essa externalidade, ou seja, contabilizá-la no ELCC, serão utilizados esses valores como referência para a aplicação da Equação 3, conforme elaborado por Miah (2017). Na Tabela 15 será realizada essa internalização e o cálculo do ELCC, considerando o custo de descarte como 0, pois a indústria de alimento não possui esse custo.

$$\begin{aligned}
 T_{ELCC} = & \sum_{\text{Matérias Primas}} C_n X_n + \sum_{\text{Manufatura}} C_n X_n + \sum_{\text{Frete LCC}} C_n X_n + \\
 & \sum_{\text{Descarte}} C_n X_n + \sum_{\text{Externalidade}} C_n X_n
 \end{aligned} \quad (3)$$

Tabela 15 - Cálculo do ELCC para 1000 Latas

<b>Custos</b>	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>Metal</b>		
CV procurement i(t)	\$ 31,75	\$ 41,30
NPV sucata i (t)	\$ 5,01	\$ 16,84
<b>Valor do Metal</b>	<b>\$ 39,95</b>	<b>\$ 58,14</b>
Lavagem & Pré-Tratamento	\$ 0,30	\$ 0,10
Pintura	\$ 0,80	\$ 0,99
Custo de Reprocessamento	\$ 0,15	\$ 0,35
Mão de Obra	\$ 5,00	\$ 5,11
Custos Overhead	\$ 2,33	\$ 2,41
Depreciação	\$ 3,58	\$ 4,20
<b>Sub- total</b>	<b>\$ 12,16</b>	<b>\$ 13,16</b>
<b>Total Cost</b>	<b>\$ 52,11</b>	<b>\$ 71,30</b>
<b>Externalidade</b>		
Emissão de CO <sub>2</sub> (g)	22,13	58,46
<b>US\$ 0,0890/kg</b>	<b>\$ 0,0020</b>	<b>\$ 0,0052</b>
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>		
Frete - LCC (KM)	\$ 6,33	\$ 7,91
<b>2.366</b>		
<b>Total ELCC</b>	<b>\$ 58,43</b>	<b>\$ 79,21</b>

Fonte: Autor

## 4.2 ELETRÔNICO

Nessa contextualização de eletrônicos será abordada a (i) análise do negócio circular, a (ii) análise LCC e a (iii) análise ELCC, conforme previamente abordado no desenvolvimento do protocolo de pesquisa.

### 4.2.1 Análise do Modelo de Negócio Circular

Segundo Oliveira e Muniz (2016), o tema da sustentabilidade é um dos pilares estratégicos de muitos fabricantes eletrônicos e está inserido na formação de sua cadeia produtiva. Desde 1992, muitas empresas eletrônicas desenvolveram programas ambientais, com o intuito de projetar produtos para facilitar sua reciclagem e a gestão de seus resíduos. Com o objetivo de se evidenciar a metodologia em ciclo fechado, foi realizada uma pesquisa referente ao estudo de caso em ciclo fechado de impressoras (setor eletrônico).

A marca de eletrônicos utilizada na pesquisa já obteve grandes prêmios de sustentabilidade importantes no Brasil e seu objetivo é reciclar de forma responsável. Desde 1987, a empresa recuperou mais de 1,58 milhões de toneladas de produtos, sendo 80% cartuchos de tinta originais e 38% dos cartuchos de toner originais, os quais são fabricados com plástico reciclado em ciclo fechado. A empresa estabeleceu um objetivo de sustentabilidade global em 2016: reciclar 1,2 milhões de toneladas de *hardware* e suprimentos de impressão até 2025.

A impressora é fabricada no Brasil através de uma operação ODM (*Original Equipment Manufacturing*). A operação de fabricação é composta por três empresas: (i) a empresa proprietária da marca do produto; (ii) a empresa responsável pela montagem do produto; e (iii) a empresa responsável pela gestão do resíduo, onde se realiza uma simbiose industrial em ciclo fechado, com a empresa responsável pela montagem do produto e seus parceiros de gestão de resíduos; e os (iv) fornecedores de matéria-prima.

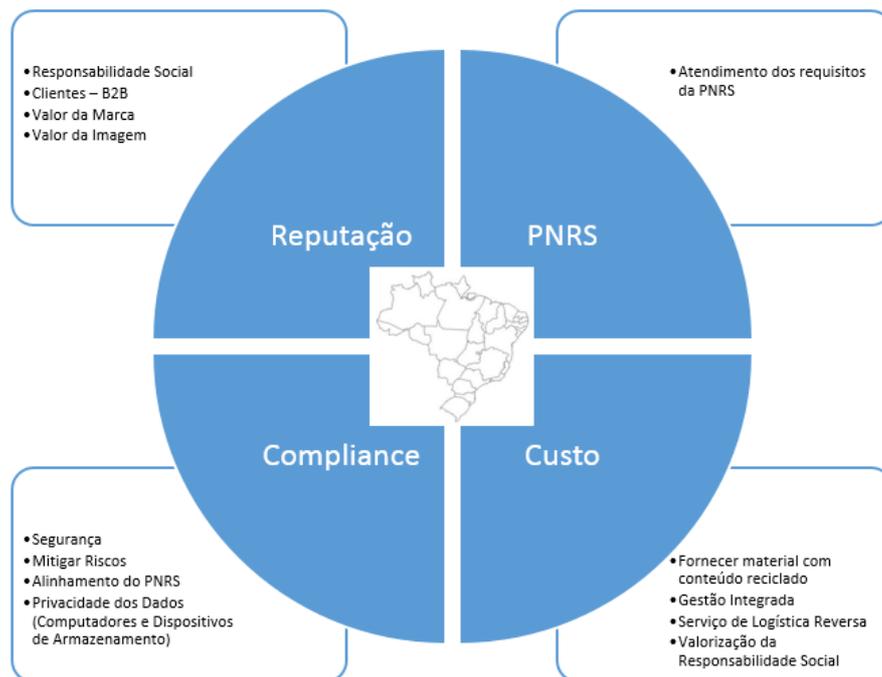
Conforme dados coletados pela pesquisa à marca de eletrônicos, a empresa conta com diversos fornecedores locais e internacionais de matéria-prima, seguindo o seu *Supplier Code of Conduct*. No Brasil, o parceiro de reciclagem está localizado no mesmo parque industrial da manufatura, o que reduz o impacto ambiental proveniente de transporte de matéria-prima reciclada para reinserção na produção, promovendo a simbiose industrial na economia circular, coligada ao grupo empresarial do fabricante ODM de produtos eletrônicos, responsável pela manufatura da impressora jato de tinta.

A viabilidade da economia circular em ciclo fechado é realizada pela parceria com o prestador de serviço. Esse parceiro estratégico possui um centro de inovação em tecnologia sustentável para a indústria eletrônica, integrado completamente na cadeia produtiva, viabilizando a sustentabilidade como vantagem competitiva. Os pilares da estratégia empresarial são observados na Figura 19; nota-se que dois pilares se referem ao apoio da PNRS e ao fornecimento de material reciclado em ciclo fechado.

Para que a operação em ciclo fechado fosse viável, o primeiro passo para estruturação da operação foi a implementação da tecnologia RFID (sigla, em inglês, para Identificação por Radiofrequência) em seu sistema. Essa decisão foi tomada pelo fabricante eletrônico pelos seguintes motivos: (i) enfrentar diversos desafios no mercado, como concorrência global; (ii) altos custos de uma cadeia de valor orientada pela tecnologia; (iii) possuir uma das cadeias de suprimentos mais complexas do mundo, com gastos anuais de US\$ 50 bilhões; o catalisador inicial foi (iv) atingir os requisitos de um de seus maiores clientes no exterior, que era a implementação o sistema RFID para etiquetagem de caixas e paletes.

Além de atender os requisitos de seu cliente, foram constatados os seguintes benefícios na implementação do sistema RFID: (i) melhora na eficiência da cadeia de fornecimento devido à redução do custo de mão de obra; (ii) aumento da velocidade das operações, devido à precisão da primeira pesagem (evitando-se retrabalhos); e (iii) aperfeiçoamento do sistema de coleta de dados. Esse sistema foi inicialmente implementado em duas fábricas no exterior e no Brasil, foi inicialmente introduzido em um projeto piloto em 2004.

Figura 19 – Pilares Estratégicos da Empresa de Gestão de Resíduos



Fonte: Autor

Segundo a pesquisa com o fabricante, esse projeto foi desenvolvido no Brasil porque a tecnologia de RFID auxilia na mensuração e melhora no reaproveitamento de matérias primas recicladas. Todas as impressoras fabricadas no Brasil recebem uma etiqueta de RFID desde o início de sua produção, quando é criado o DNA do produto; porém, a implementação de RFID em PCs está em andamento, tendo alguns SKUs (*Stock Keeping Unit*, ou Unidades de Manutenção de Estoque) produzidos localmente com a tecnologia de radiofrequência RFID. A finalidade da implementação desse projeto piloto no Brasil ajudou a atingir as metas de sustentabilidade e o fechamento do ciclo produtivo do produto, pois, além de ajudar o fabricante a rastrear produtos em seu ciclo final de vida (EoL), assegurou o descarte do produto e a re inserção das matérias-primas em ciclo fechado.

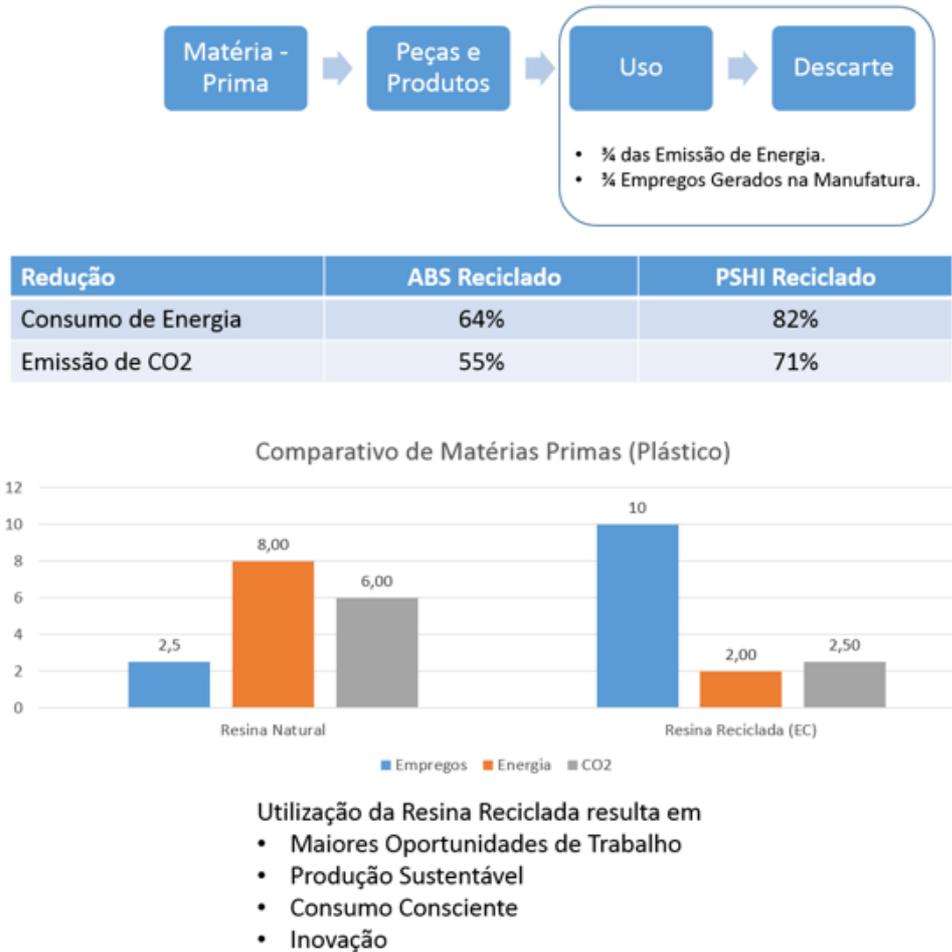
Dentro da etiqueta RFID são inseridas as informações do DNA do produto, como número de série, versão do *firmware*, validade do cartucho e país de destino. Quando o produto chega à fase EoL, o produto é coletado através do processo de logística reversa, como explicado anteriormente; ao chegar na fábrica do prestador de serviço de reciclagem, os produtos são identificados pelo sistema RFID, porém os produtos que não possuem etiqueta são identificados manualmente e ambos encaminhados ao processo de separação e desmontagem. A implementação do sistema RFID agregou no processo gestão de resíduos, na desmontagem e separação dos produtos, pois as informações são enviadas a um *software* gerencial, que identifica informações como os componentes do produto e a quantidade de materiais a serem reciclados.

Essa operação complementou a eficiência do gestor de resíduo e ajudou a marca do produto atingir grande partes dos requisitos da PNRS. O gestor de resíduos, além de processar a sucata dos aparelhos eletrônicos de seus clientes, agrega valor em sua operação de inovação e logística reversa, conforme mostrado no quadro do Apêndice B, a fim de auxiliar seus clientes no cumprimento de 14 dos 15 objetivos da PNRS.

Outro dado relevante para o estudo do modelo durante a pesquisa foi que em 2017 o fabricante recolheu 613 toneladas de equipamentos para envio ao processo de reciclagem em ciclo fechado, tendo fabricado desde a implementação do projeto mais de 7,7 milhões de produtos reciclados, chegando a possuir o índice de 15% de conteúdo reciclado nos produtos. Agregam-se essas informações às informações de dados de mercado, sendo que o mercado brasileiro de impressoras a jato de tinta em 2017 foi de 1,5 milhões de unidades vendidas, e a marca da pesquisa possui 38,4% de fatia de mercado (ocupando o 1º lugar) (IDC, 2018). Com base nessas informações, pode-se concluir dois pontos: (i) a marca vende anualmente 576 mil impressoras jato de tinta e (ii) coleta 102.166 impressoras anualmente, considerando o peso médio das impressoras 5,9 kg (617 toneladas/5,9 kg).

Os resultados ambientais foram redução de CO<sub>2</sub>, economia de água, diminuição da utilização de combustível fóssil no processo produtivo, gestão dos resíduos dos cartuchos nos aterros, atendimento de 14 dos 15 requisitos exigidos pela PNRS e vantagem competitiva da marca perante aos concorrentes. Os resultados dos benefícios sociais foram também elevados, resultando em geração de emprego e melhoria à comunidade. A Figura 20 mostra o resumo das conquistas ambientais e sociais. Para que esses resultados fossem alcançados, além de o fabricante OEM desenvolver uma empresa para a gestão do resíduo e reciclagem dos produtos, a marca responsável investiu nesse projeto um total de R\$ 17 milhões em pesquisa e desenvolvimento da tecnologia RFID.

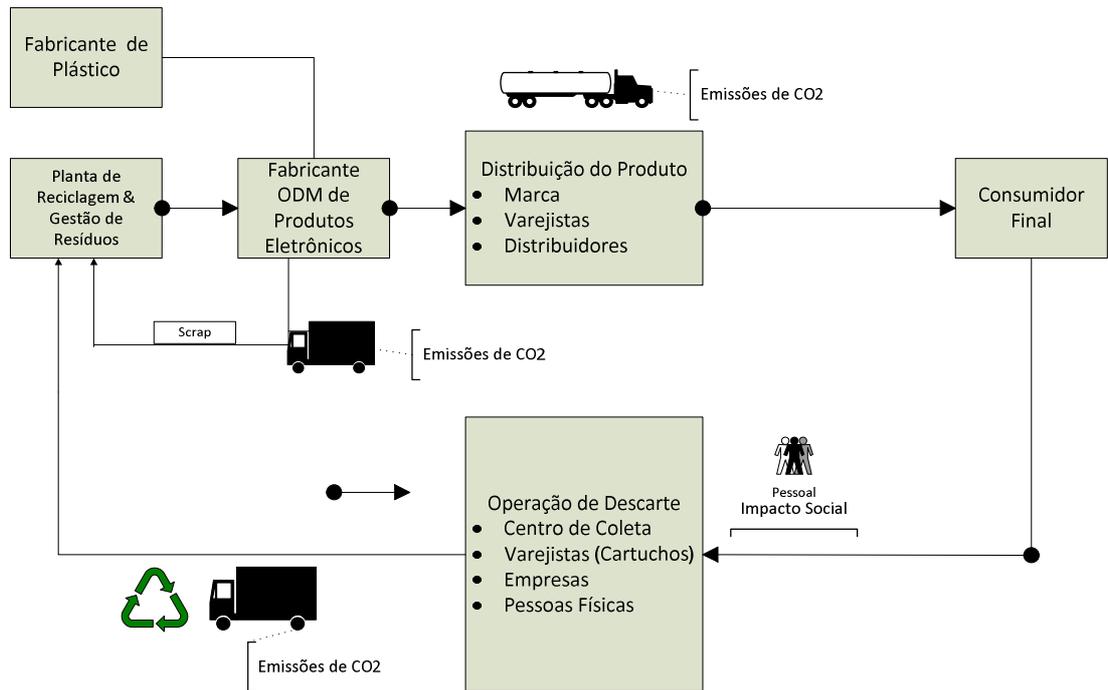
Figura 20 – Benefícios ambientais e sociais



Fonte: Autor

Com base no levantamento dos dados pesquisa em campo, conforme descrito anteriormente, o modelo de negócio circular para as peças plásticas e outros componentes funciona através uma operação ODM (*Original Equipment Manufacturing*). A operação de fabricação é composta por três empresas; (i) a empresa proprietária da marca do produto, (ii) a empresa responsável pela montagem do produto e (iii) a empresa responsável pela gestão do resíduo (Coleta e Reciclagem) e (iv) os fornecedores de peças e insumos. Constatou-se que o plástico pode ser fornecido tanto pelo gestor de resíduo, o qual realiza a reciclagem do plástico e pelos fabricantes de matéria-prima plástica. Baseando-se nessas informações, a figura juntamente com todos os stakeholders está representada na figura 21.

Figura 21 – Cadeia de Fornecimento Ciclo Fechado do Plástico para Equipamentos Eletrônicos



Fonte: Autor

Os *stakeholders* possuem as seguintes responsabilidades na cadeia em ciclo fechado:

- a) Fabricante de plástico
  - Responsável pela fabricação do material ABS e HIPS.
  - Responsável pela reciclagem dos plásticos.
  - Responsável pela entrega do material.
- b) Empresa ODM (Original Design Manufacture) de produtos eletrônicos
  - Responsável pelo processamento do plástico como extrusão parcial de peças plásticas e gerenciamento de terceiros.
  - Responsável pela montagem das placas eletrônicas
  - Responsável pela montagem do produto (impressora) e inserção do cartucho no produto (insumo eletrônico importado).
  - Responsável pela operação logística do produto a marca de eletrônicos.
- c) Marca de eletrônicos, varejistas e atacadistas
  - Responsável pela promoção e venda do produto ao consumidor final.
  - Gerenciamento em varejistas e distribuidores que realizam a coleta de impressoras e cartuchos do consumidor final.
- d) Parceiro (planta) de reciclagem & gestão de resíduos

- Responsável pela coleta em postos de descartes, varejistas e consumidor final.
- Responsável pela separação dos materiais e insumos eletrônicos.
- Responsável pela reciclagem de plástico ABS e HIPS.
- Responsável pela logística de descarte e comercialização de sucata a parceiros específicos.
- Responsável pela extrusão parcial de peças plásticas para produtos eletrônicos.

#### **4.2.2 LCC**

Essa seção abordará o desenvolvimento do LCC, apoiado pela ferramenta PSILA, integrado o Análise de Negócio, a Fase EoL, a fase MP e o cálculo do custo.

##### **4.2.2.1 Gestão de Resíduos (EoL)**

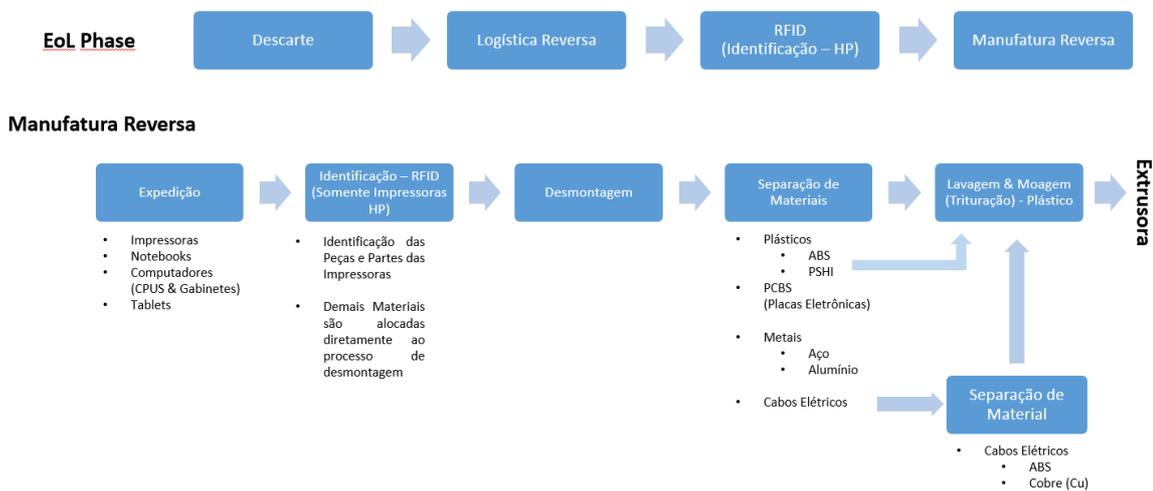
Durante a visita em campo, dentro do prestador de serviço de gestão de resíduos, o processo de separação e desmontagem é realizado inicialmente por modelo e as separações são “clusterizadas” nas seguintes partes e peças: (i) PCB (placas eletrônicas) e componentes metálicos (essas peças são enviadas e vendidas a empresas que recuperam materiais preciosos); (ii) tampa com etiqueta (enviada a uma empresa que fabrica papel plastificado); (iii) espuma de tinta (vendida para gerar energia em empresas que utilizam maquinário de caldeiras); (iv) cabeça de impressão do cartucho (enviada e vendida a empresas que recuperam materiais preciosos); e (v) corpo do cartucho e corpo da impressora, destinados respectivamente à reciclagem.

Os plásticos ABS e HIPS do corpo da impressora passam por um processo de lavagem, secagem e trituração; posteriormente são adicionadas cargas de plásticos de alta pureza, devido à perda de fusão (FR), a fim de se compor o plástico reciclado a ser inserido em ciclo fechado. A peça de plástico do corpo e da tampa do cartucho contém um pó de vidro para realizar um efeito brilhante; ela pode ser reciclada, mas não pode ser utilizada em ciclo fechado, devido a sua qualidade – porém esse material pode ser utilizado em outras aplicações de peças plásticas, como em um “pálete plástico” ou plástico para aplicação em estruturas para a indústria moveleira. O centro de reciclagem também presta serviço e recicla cartuchos e toners de impressoras de grande porte.

A representação geral do (i) processo de gestão de resíduo de equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico, do (ii) processo de fabricação de peças plásticas para equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico e do (iii) processo de gestão de resíduos dos componentes de cartucho de tinta está demonstrada nas figuras 22, 23 e 24.

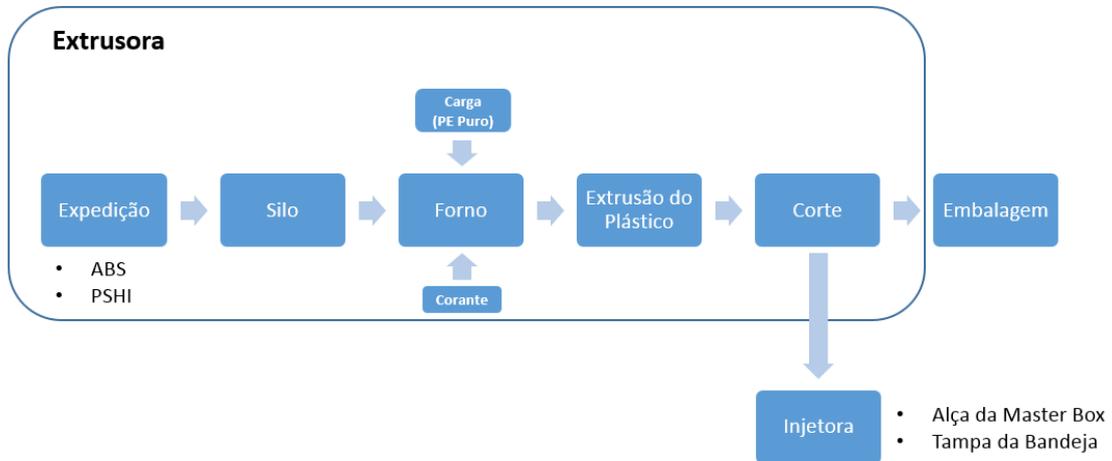
Analisando a integração dos processos de gestão de resíduos e reciclagem (EoL) com a produção total de impressoras na fase de produção principal (MP), os seguintes pontos importantes foram destacados nas respostas do questionário pela empresa da marca proprietária e durante a visita realizada ao parceiro de gestão de resíduos e reciclagem: (i) atualmente a taxa de retorno das impressoras em EoL é baixa e a taxa de retorno dos cartuchos em EoL chega a 100%; (ii) o parceiro de gestão de resíduos e reciclagem não possui capacidade produtiva para processar todo o parque instalado de impressoras EoL, porém isso não é um impacto devido à baixa taxa de retorno dessas impressoras. Adianta-se a conclusão de que o investimento inicial realizado por ambas as empresas para operacionalizar a EC, inicialmente, foi objetivado ao pilar estratégico de sustentabilidade da marca e ao atendimento da PNRS para comercialização do produto no mercado, sendo essa conclusão afirmada por ambas as empresas.

Figura 22 – Processo de gestão de resíduo de equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico



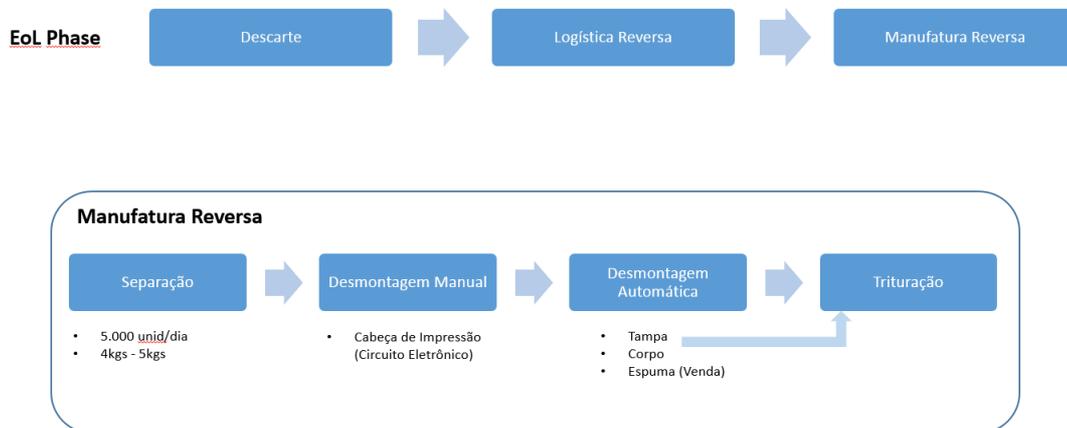
Fonte: Autor

Figura 23 – Processo de fabricação de peças plásticas para equipamentos eletrônicos e reciclagem de plástico



Fonte: Autor

Figura 24 – Processo de gestão de resíduos dos componentes de cartucho de tinta



Fonte: Autor

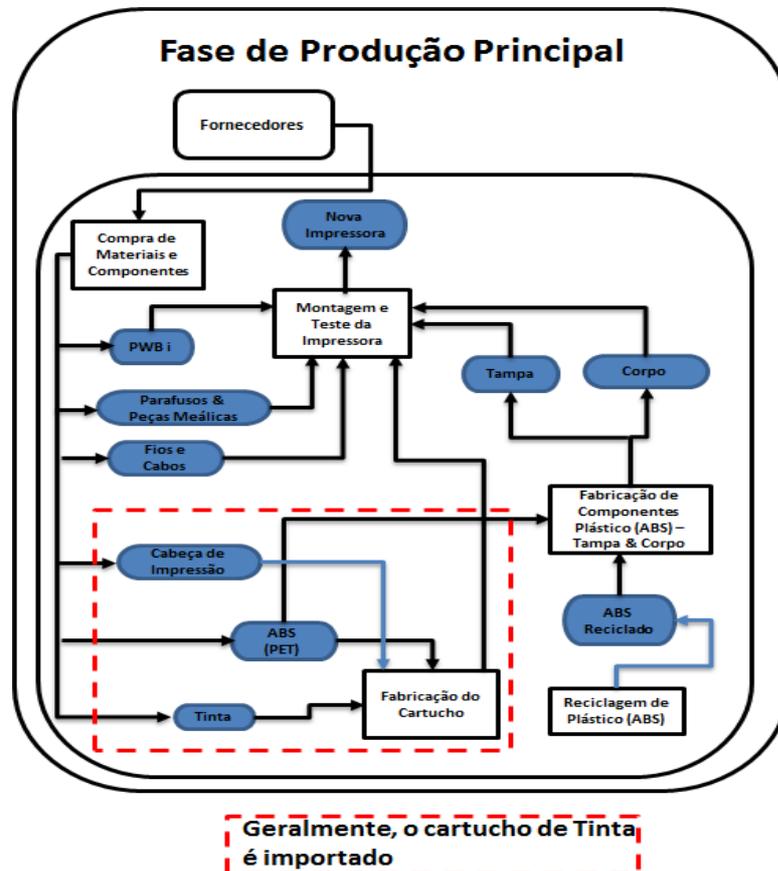
Finalizando a análise da fase EoL, a empresa gestora de resíduos e reciclagem desenvolveu o sistema de logística reversa, a fim de garantir a qualidade do processo por completo, integrado ao sistema do fabricante eletrônico e da marca responsável pelo produto. O parceiro de gestão de resíduos e reciclagem possui uma rede de mais de 400 postos de coleta e apoia o fabricante eletrônico nesse programa. A logística reversa dos produtos é realizada com mais de 250 veículos disponíveis no território nacional e 3 veículos exclusivos para a região metropolitana de São Paulo. Segundo o fabricante eletrônico, o programa oferece duas

opções ao cliente: (i) levar o cartucho e a impressora a um posto de coleta mais próximo de sua residência ou empresa; e (ii) caso o volume seja maior (a partir de 5 cartuchos ou mais impressoras), o cliente pode requisitar uma coleta em seu local ao fabricante. Mas para que essa operação ocorra, haverá a necessidade de o cliente atender os pré-requisitos de embalagem descritos previamente pelo programa.

#### 4.2.2.3 Processo Principal de Produção (MP)

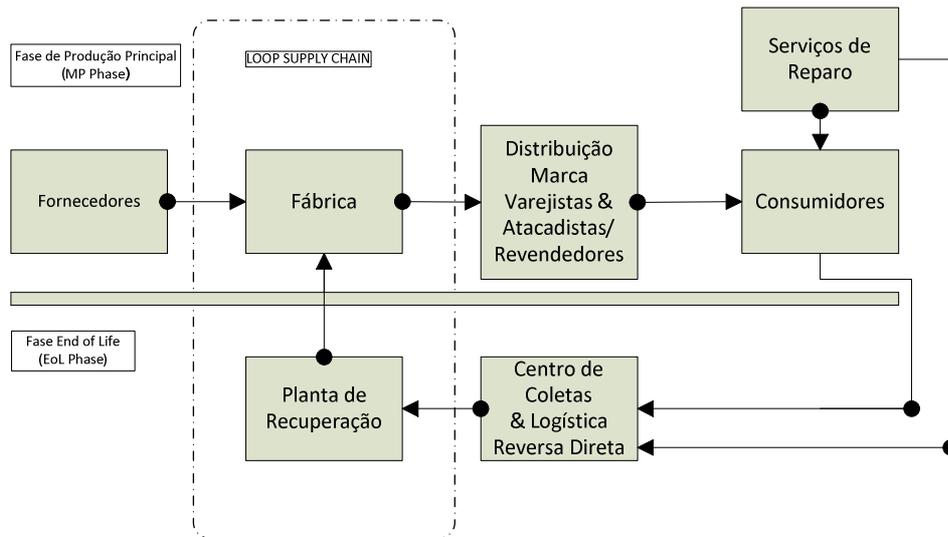
O processo produtivo principal é realizado através de quatro etapas principais: (i) compra de materiais; (ii) fabricação das peças plásticas (através do processo de injeção plástica); (iii) fabricação do cartucho (conforme o SKU, o cartucho é importado e inserido no processo de montagem da impressora); e (iv) montagem das placas eletrônicas na impressora (PCBs). A Figura 25 representa a fase de produção principal da impressora.

Figura 25 - Fase de Produção Principal da Impressora.



Após a representação do processo de produção principal, pode-se estruturar o ciclo fechado e utilizar seu conceito para se estruturar a ferramenta LCC (apoiada pela ferramenta PSLIA) no sistema produtivo de ciclo fechado da impressora, conforme representado nas figuras 26 e 27.

Figura 26 - Sistema Conceitual de Ciclo Fechado para a Impressora



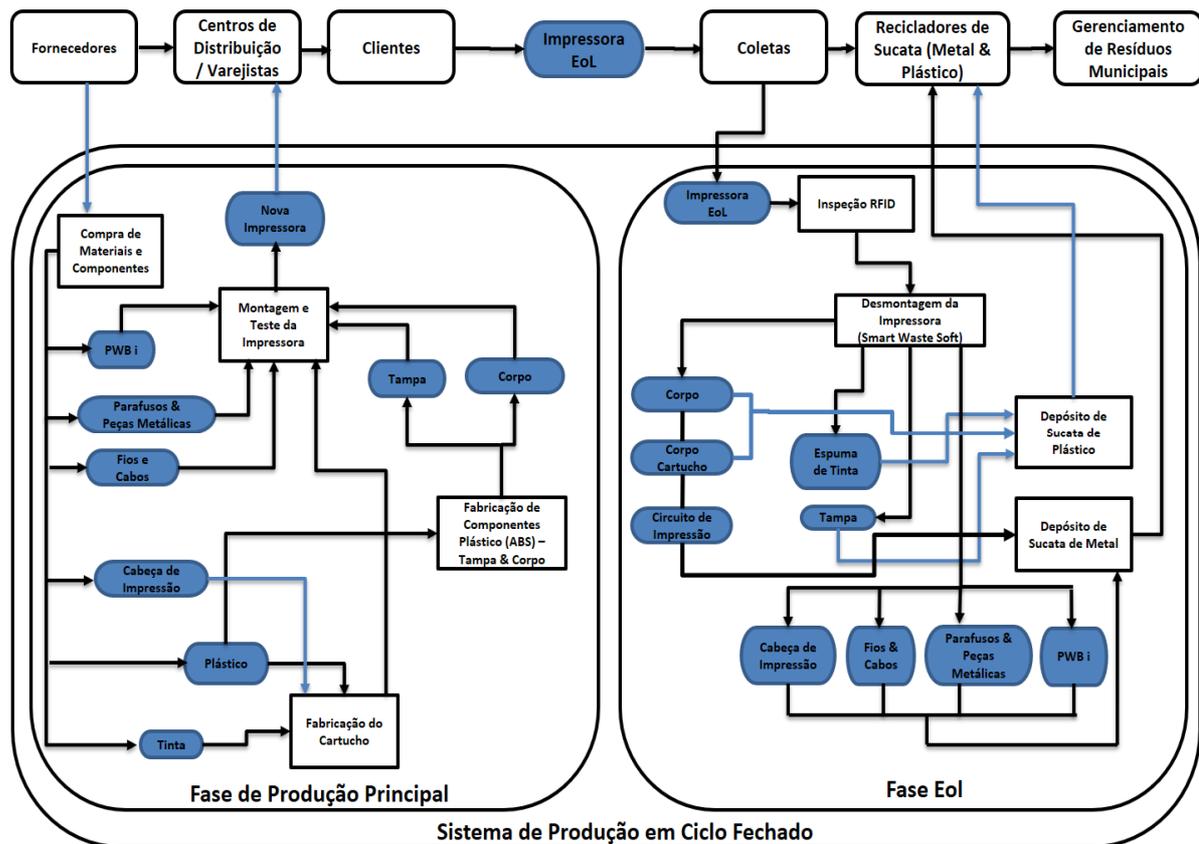
Fonte: Autor

Após a conceptualização do sistema produtivo em ciclo fechado, o próximo fator é a análise de geração de sucata no processo produtivo principal. Na visita realizada ao gestor de resíduo e reciclagem, foi descrito pelo líder de produção que as peças plásticas utilizadas na montagem da impressora são compostas de materiais plásticos classificados como ABS e HIPS.

O plástico ABS, também conhecido quimicamente como acrilonitrila butadieno estireno, é um material termoplástico muito utilizado na indústria devido a sua viabilidade econômica, resistência mecânica, leveza e flexibilidade e com inúmeras compatibilidades de cores e aspectos (opaco e transparentes). É inflamável em altas temperaturas em comparação a outros materiais plásticos, porém apresenta uma boa resistência térmica (resistência a altas e baixas temperaturas, sendo utilizado como um isolante elétrico). Sua aplicação está presente em vários segmentos industriais e nos eletroeletrônicos como celulares, monitores e impressoras. O poliestireno HIPS (*High Impact Polystyrene*, ou Poliestireno de Alto Impacto) é um polímero obtido através do monômero de estireno em solução com 5% a 15% de polibutadieno, sendo que as partículas microscópicas de borracha que se formam ao longo do processo químico alteram as propriedades do poliestireno, aumentando sua resistência ao impacto e alongamento. Esse material é atóxico e aplicado em diversos setores industriais,

residenciais e comerciais pela sua excelente rigidez, formabilidade e viabilidade econômica. Suas desvantagens são observadas nas limitações de aplicações industriais que necessitam de uma alta resistência mecânica, térmica e química, estando presente em vários segmentos industriais e nos eletroeletrônicos como impressoras (INNOVA; ECYCLE, 2018).

Figura 27 - Conceptualização do sistema de produção em ciclo fechado para a Impressora Jato de Tinta.



Fonte: Autor

Os únicos elementos que retornam em ciclo fechado são os plásticos ABS e HIPS utilizados na fabricação de peças plásticas para o corpo, tampa e outras estruturas da impressora. Durante a visita de campo, os dados primários coletados referentes à geração de sucata no processo de produção da impressora (21,60% de sucata gerada durante o *Mainstream Production Phase*, ou “Processo Principal de Produção”). Conforme as informações teóricas do PSILA, é necessário adotar-se o valor de geração de sucata, ou seja, 21,60%. Quando a sucata de plástico é inserida no processo de reciclagem, há uma perda de 2% (forno), ou seja, há um retorno de 98% da sucata coletada durante o processo produtivo (OF), mesmo valor

utilizado para o alumínio e aço, sendo esses os valores de recuperação, tanto para ambos os plásticos ABS e HIPS.

Ainda, através da visita em campo e através do questionário enviado, devido às razões de confidencialidade das empresas, foram levantados os dados médios de (i) conteúdo reciclado por composição química, (ii) mix de composição de materiais plásticos da impressora e (iii) taxa de geração de sucata na fabricação de peças, conforme demonstrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Taxa média de conteúdo reciclado, mix de composição de peças e geração de sucata

Material		Conteúdo %	Composição de Peças %	Geração de Sucata %
Puro	ABS	75%	70%	21,60%
	PIHS		30%	
Reciclado	ABS	15%	70%	
	PIHS		30%	

Fonte: Autor

Com a finalidade de melhorar o entendimento sobre os dados de composição de conteúdo e peça, para a aplicação do método LCC na seção posterior de análise de custo, será comparando a diferença entre o custo da matéria-prima pura e a matéria-prima e reciclada do plástico. Conforme a pesquisa em campo com as operações de manufatura, essa comparação necessitará seguir as seguintes premissas: (i) a composição das peças plásticas, devido aos requisitos de qualidade e processo, não pode ser totalmente oriunda de material reciclado e, segundo as informações da marca responsável pelos produtos eletrônicos, (ii) a média de conteúdo reciclado de cada material plástico é 15% na composição das peças plásticas.

#### ***4.2.2.4 Estruturação completa da informação do produto e mapa de ciclo de vida do produto***

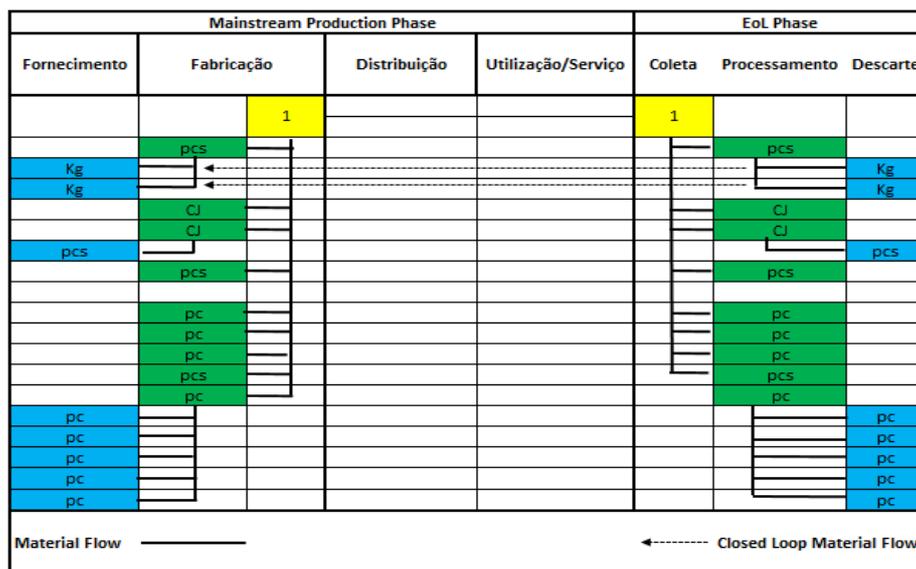
Baseando-se nas informações da revisão da literatura e as informações descritas anteriormente no ciclo produtivo tanto MP e EoL (figuras 25 e 26), pode-se montar a estruturação completa do produto (Figura 28) e o mapa do ciclo de vida (Figura 29). Conforme estruturado nas figuras 28 e 29, após elaboração dessas informações, cria-se a orientação para elaboração do custo direto de produção da matéria prima.

Figura 28 - Completa estrutura de informação do produto para a impressora jato de tinta

Mainstream Production Phase						End-of-Life Phase									
Peças			Número da Peça	Descrição da Peça	PRMPHij (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça	Opção de EoL		Eficiência da Sucata	Peças			Descrição Qualitativa da Peça EoL	PREoL ij (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça
j	i	k					Fabricante	3rd (Gestor de Resíduo)		j	i	k			
1			1	Impressora		Unidade	Revenda & Recuperação				1	Empressora Usada Empressora Não-Vendável	1	Unidade	
(Nest)		pcs	2	Total - Peças Plásticas		pcs	Reciclagem Interna	Reciclagem Interna	100%		pcs	Sucata de Plástico	1	pcs	
(Chia)		Kg		ABS (Plástico)		Kg	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%	Kg		ABS Reciclado	3,3	Kg	
(Chia)		Kg		PSH (Plástico)		Kg	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%	Kg		PSH Reciclado	1,42	Kg	
(Nest)		CJ	3	Conectores & Peças Metálicas		CJ	Descarte	Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		CJ	Sucata de Metal Grade B	1	CJ	
(Nest)		CJ	4	Automação		CJ	Descarte	Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		CJ	Sucata de Plástico	1	CJ	
(Chia)		pcs		Mecanismo de Impressão + Motor		pcs		Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%	pcs		ABS Reciclado	1	pcs	
(Nest)		pcs	5	PCB (Placas Eletrônicas)		pcs	Descarte	Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		pcs	Sucata de Metal Grade A	n	pcs	
(Nest)				Acessórios e Insumos			Descarte	Reciclagem Externa	100%			Sucata de Metal Grade A			
(Chia)		pc	6	Cabo de Alimentação AC		pc		Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		pc	Sucata de Metal Grade A	1	pc	
(Chia)		pc	7	Fonte de Alimentação		pc		Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		pc	Sucata de Metal Grade A	1	pc	
(Chia)		pc	8	Cabo de Transmissão de Dados		pc		Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		pc	Sucata de Metal Grade A	1	pc	
(Chia)		pcs	9	Embalagem & Manual		pcs		Venda de Sucata de Metal (3ª Part)	100%		pcs	Sucata de Metal Grade A	2	pcs	
(Nest)		pc	10	Cartucho		pc	Descarte	Reciclagem Interna	100%		pc	Sucata de Plástico B	4	pc	
(Chia)				Corpo do Cartucho		pc			100%	pc		Sucata de Plástico	1	pc	
(Chia)		pc		Plástico+Pó de Vidro (Cartucho)		pc		Reciclagem Interna	100%	pc		Sucata de Plástico	1	pc	
(Chia)		pc		Depósito		pc			100%	pc		Sucata	1	pc	
(Chia)		pc		Espuma + Tinta de Impressão		pc		Venda de Resíduo	100%	pc		Sucata	1	pc	
(Chia)		pc		PWB (Cabeça de Impressão)		pc		Venda de Sucata de Metal	100%	pc		Sucata de Metal Grade A	1	pc	

Fonte: Autor

Figura 29 - Mapa do ciclo de vida integrado da impressora jato de tinta



Fonte: Autor

#### 4.2.2.5 Custeio da matéria prima em ciclo fechado e a integração no custo completo do produto

Conforme estruturado nas figuras 27, 28 e 29; após elaborar o sistema conceitual de produção de ciclo fechado e o sistema completo de informação de produto, cria-se uma orientação a fim de elaborar do custo direto de produção da matéria-prima. Utilizando o modelo PSLIA para determinarmos como base o volume de produção necessário para a fabricação das

peças plásticas em ciclo fechado, pode-se determinar que as fórmulas 23, 24, 25 e 26 (as mesmas aplicadas para o estudo de latas de alumínio) poderão ser aplicadas para o estudo de peças plásticas para impressoras jato de tinta, baseando-se nas fórmulas da 4, 5, 6 e 7 da fundamentação teórica do PSILA.

$$PV = OV - RV \quad (23)$$

$$OV = OV_{i(t)} \cdot PR \cdot mp_{\frac{k}{i}(t)}, \quad i \# \{\text{root} = j\} \quad (24)$$

$$RV = RV_{i(t-1)} \cdot PR \cdot eol_{\frac{k}{i}(t-1)} \cdot OF \cdot Bcl, \quad i \# \{\text{root} = j\} \quad (25)$$

$$Bcl, i = \begin{cases} 1, & \forall \in \{\text{ciclo fechado}\} \\ 0, & \forall \notin \{\text{ciclo fechado}\} \end{cases} \quad (26)$$

Onde:

- a) PV = Volume de compra de material (plástico) da peça i;
- b) OV = Volume de produção de peças plásticas (j), tendo sua componente no tempo t;
- c) RV = Volume de peças (i) sucateadas para recuperação, tendo sua componente durante o tempo t-1;
- d) PR mp = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por peça (j) no tempo t;
- e) PR eol = Volume de material (k) da peça (i) por impressora (j) gerado durante a fase de produção no tempo t-1;
- f) OF = Perda fracionária do material k;
- g) Bcl = Variável binária, onde 1 a peça (i) está em ciclo fechado e 0 a peça não está em ciclo fechado.

Outro ponto importante que é necessário destacar, é que os materiais em ciclo fechado são oriundos de um período anterior (neste caso, o período de estudo temporal é mensal). Isso se deve ao período necessário de processamento da sucata pela reciclagem. Nesse caso, adotaremos 1 mês ou 30 dias de produção (t-1), o que é similarmente adotado pela manufatura de reciclagem do plástico.

Para se exemplificar uma aplicação do modelo matemático descrito anteriormente, pode-se considerar uma produção 5.000 unidades de peças plásticas, por exemplo, durante o mês atual ou período t. Para esse caso, caso haja material processado anteriormente em ciclo fechado – produção do mês anterior (t-1) –, são 5.000 unidades e RV (21,60%) – 1.080 unidades

de volume de sucata –, e, conforme demonstrado na Tabela 16, considera-se para as peça plástica de Material ABS (i) da impressora (j) um peso de 3,30 kg/kg (PR mp k/i) e de sucata gerada por cada peça ABS (i) por impressora (j) como  $RV_i \times PR_{eol k/i}$ . Considerando essas premissas, obtém-se o seguinte resultado:

$$PV_i(t) = 5.000 \times 3,30 (OV) - 1.080 \times 3,30 \times 98\% \times 1(RV)$$

$$PV_i(t) = \mathbf{13.008 \text{ kg ou } 13,01 \text{ toneladas}}$$

Padronizando a metodologia que foi utilizada para a lata de alumínio, o segundo passo é o dimensionamento do custo variável direto da matéria prima plástica em ciclo fechado. Ressalta-se novamente que, na revisão teórica, Low et al. (2014) descrevem que os custos variáveis totais de um material em ciclo fechado é a somatória dos custos variáveis de *procurement*, ou compra de materiais, fabricação, distribuição, serviços, coleta, processamento e descarte/sucata. Novamente, nesse estudo de caso será abordada somente a análise do custo de matéria-prima plástica, que são as fases de *procurement*, ou compra de matéria-prima e descarte da sucata. Para essas duas fases, pode-se estruturar as equações de acordo com a revisão da literatura, nas equações 27, 28, 29 e 30 (as mesmas equações utilizadas para a lata de alumínio), conforme as equações 8, 12 e 18. Nota-se que a sucata é oriunda de um tempo anterior (t-1) ou tempo de produção atual (t), sendo necessário contabilizá-la no custo da matéria prima em valor presente.

$$CV_{i(t)} = CV_{\text{procurement } i(t)} + NPV_{\text{sucata } i(t)} \quad (27)$$

Os custos de compra de sucata podem ser representados nas mesmas equações utilizadas para o alumínio, que são as equações 28 29 e 30:

$$CV_{\text{procurement } i(t)} = PV_{i(t)} \cdot PR_{mp \frac{k}{i}(t)} \cdot P_{\text{plástico} \cdot k(t)} \quad (28)$$

Onde:

- a)  $OV$  = Volume de produção por peça (i) no tempo t;
- b)  $PR_{mp}$  = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por impressora (j) no tempo t;

- c)  $P_{\text{metal}} = \text{Preço de compra da matéria-prima plástica (ABS ou PISH - k) no tempo } i(t).$

$$NPV_{\text{sucata},i(t)} = \frac{CV_{\text{sucata},i(t-1)}}{(1-d)^t} \quad (29)$$

$$CV_{\text{sucata},i(t-1)} = RV_{i(t-1)} \cdot PR_{\text{eol},\frac{k}{i}(t-1)} \cdot OF \cdot P_{\text{proces}, k(t-1)} \quad (30)$$

Onde:

- $RV = \text{Volume de peças (i) sucateadas para recuperação durante o tempo } t-1;$
- $PR_{\text{eol}} = \text{Volume de material (k) da peça (i) por impressora (j) gerado durante a fase de produção no tempo } t-1;$
- $OF = \text{Perda de fração (Ex. Al – fusão no forno de reciclagem) do material } k;$
- $P_{\text{proces}} = \text{Preço ou custo de transformação da sucata em matéria prima reutilizável (ABS ou PISH) no tempo } i(t-1) \text{ pela reciclagem de plástico ou terceiro reciclador};$
- $d = \text{Custo financeiro do estoque da sucata.}$

Antes de se exemplificar os custos das peças plásticas (i) para a impressora (j) com as equações elaboradas anteriormente, é muito importante o entendimento da composição do custo da matéria prima plástica (P plástico k). Foi realizada uma pesquisa de preço (i) com os principais fabricantes comerciais e os gestores comerciais relacionados a essas empresas, (ii) empresa responsável pela gestão de resíduos e reciclagem e (iii) empresas de reciclagem de plástico no período de junho de 2018. Os preços estão relacionados na Tabela 17.

Tabela 17– Preços estimados dos plásticos para injeção de peças eletroeletrônicas

Material (k)		P plástico (R\$)	
Puro	ABS	R\$	8,08
	PSHI	R\$	5,46
Reciclado	ABS R	R\$	6,87
	PSHI R	R\$	4,64

Material (k)	Valor - Sucata de Plástico		P process k – Preço Transformação
ABS	R\$	1,63	R\$ 5,24
PSHI	R\$	1,63	R\$ 3,02

Fonte: Autor

Para a operação de reciclagem em ciclo fechado, o gestor de resíduos e reciclagem administra a sucata plástica das impressoras e recicla o plástico reciclado para a empresa de eletrônicos e somente terá o custo de transformação da sucata de plástico. Porém no processo de reciclagem existe uma perda de fusão (perda do forno da extrusora de plástico – 2%), a qual está denominada no modelo matemático como OF (*outgoing fraction*), que será necessário contabilizar para dimensionar a quantidade de produção e o custo da peça plástica.

Após a descrição dos custos da matéria prima metálica, a fim de se iniciar as análises, será necessário considerar duas premissas. A primeira premissa (i) é a definição das variáveis  $t$ , a qual será considerada como uma produção de unitária para o tempo  $t$  (mês atual) e uma produção para o tempo anterior ( $t-1$ ) de 1, afim de visualizar o benefício da utilização do material em ciclo fechado para ambos materiais. A segunda premissa (ii) é o mix de material a ser comparado. Conforme descrito anteriormente, essa comparação será realizada de acordo com a pesquisa de campo nas operações de manufatura; (a) as composições das peças plásticas devido aos requisitos de qualidade e processo não podem ser totalmente oriundas de material reciclado e (b) segundo informações da marca responsável por produtos eletrônicos, o a média de conteúdo reciclado de cada material plástico é 15% na composição das peças plásticas. Devido ao objetivo de o trabalho ser a análise de custos em EC, isso pode ser considerado como uma lacuna de pesquisa futura, afim de se determinar qual seria o valor máximo a ser implementado de conteúdo reciclado em peças plásticas de produtos eletrônicos, com a finalidade de se equilibrar os requisitos de qualidades do produto, desempenho de processo (eficiência e produtividade) e menores custos de produção. Será considerado dois cenários de peças plásticas como composição ABS e HIPS; (i) peças com material puro (P1) e (ii) peças com material puro mais conteúdo reciclado de 15% (P2). Nota-se que para os dois cenários de peças plásticas não haverá alteração de peso.

Tabela 18 - Peso de peça plástica por material (i/k) por impressora (j)

Tipo	Peso por impressora (kg)*	Material	Peso por Material (k/i)	
			Kg	G
P1	PR mp k/i (t) (kg)	ABS	3,30	3.300
	PR eol k/i (t-1) kg			
	PR mp k/i (t) (kg)	PISH	1,42	1.420
	PR eol k/i (t-1) kg			
P2	PR mp k/i (t) (kg)	ABS	2,81	2.805
	PR eol k/i (t-1) kg			
	PR mp k/i (t) (kg)	PISH	1,21	1.207
	PR eol k/i (t-1) kg			
	PR mp k/i (t) (kg)	ABS	0,50	495
	PR eol k/i (t-1) kg			
	PR mp k/i (t) (kg)	PISH	0,21	213
	PR eol k/i (t-1) kg			

Fonte: Autor

Tabela 19 - Produção OV i (t) e RV i (t-1) para uma PV i (t) (produção) de 1 impressora – Aplicação das fórmulas 23, 24 e 25.

	Material	
	P1	P2
PV i(t)	1	1
RV	21,60%	21,60%
PV i(t-1)	1	1
OF	98%	98%
RV i(t-1)	0,21	0,21
OV i(t)	0,79	0,79

Fonte: Autor

A próxima etapa de cálculo é a definição dos custos da matéria prima plástica e os custos de processamento de sucata para cada material (P process k), conforme citado demonstrado na Tabela 17. A partir das análises dos quadros acima, obtêm-se o valor das variáveis para o cálculo dos custos. Dois pontos que são importantes são (1) que a variável  $P\ process\ k\ (t)$  será considerada igual ao seu período anterior (t-1), pois no período da pesquisa realizada seus valores eram idênticos, e (2) o custo financeiro  $d$  é de 1,98% a.m. ou ao período t (t = mês) para atualização do custo em valor presente.

Tabela 20 - Custo de aquisição de material – CV procurement i(t) – Fórmula 28

	Material					
	P1		P2			
	ABS	PISH	ABS	PISH	ABS R	PISH R
<b>OV i(t)</b>	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	3,30	1,42	2,81	1,21	0,50	0,21
<b>P Plástico (R\$)</b>	8,08	5,46	8,08	5,46	6,87	4,64
<b>CV procurement i(t)</b>	<b>21,02</b>	<b>6,11</b>	<b>17,87</b>	<b>5,20</b>	<b>2,68</b>	<b>0,78</b>

Fonte: Autor

Tabela 21 - Custo de aquisição de material – CV sucata i(t-1) – Fórmula 30 &amp; NPV Sucata – Fórmula 29

	Material					
	P1		P2			
	ABS	PISH	ABS	PISH	ABS R	PISH R
<b>RV i(t-1)</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>
<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	3,30	1,42	2,81	1,21	0,50	0,21
<b>P process R\$/kg</b>	5,24	3,02	5,24	3,02	5,24	3,02
<b>C sucata i(t-1) R\$</b>	<b>3,66</b>	<b>0,91</b>	<b>3,11</b>	<b>0,77</b>	<b>0,55</b>	<b>0,14</b>

	Material					
	P1		P2			
	ABS	PISH	ABS	PISH	ABS R	PISH R
<b>C sucata i(t-1)*</b>	3,66	0,91	3,11	0,77	0,55	0,14
<b>d</b>	1,98%	1,98%	1,98%	1,98%	1,98%	1,98%
<b>t</b>	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
<b>NPV sucata i (t) – R\$</b>	<b>3,81</b>	<b>0,94</b>	<b>3,24</b>	<b>0,80</b>	<b>0,57</b>	<b>0,14</b>

Fonte: Autor

Tabela 22 - Custo variável do material – CV plástico (j(t)) – Fórmula 27

	Material					
	P1		P2			
	ABS	PISH	ABS	PISH	ABS R	PISH R
<b>CV procurement i(t)</b>	21,02	6,11	17,87	5,20	2,68	0,78
<b>NPV sucata i (t)</b>	3,81	0,94	3,24	0,80	0,57	0,14
<b>CV Material (R\$/u)</b>	24,83	7,06	21,11	6,00	3,25	0,92

	Material	
	P1	P2
<b>CV Material (R\$/u)</b>	R\$ 31,89	R\$ 31,28

Fonte: Autor

Considerando esse modelo matemático, juntamente com as premissas levantadas anteriormente, obtêm-se que o custo de matéria-prima plástica pura da impressora é aproximadamente 1,95% maior (R\$ 31,89 > R\$ 31,28) quando comparado ao custo de matéria-prima plástica com conteúdo reciclado. Adicionando outros custos variáveis e fixos, o custo total da estimado é representado na Tabela 23. Os custos dos componentes e o custo total da impressora foram baseados em pesquisas de importação da MDIC (2018) e do Instituto de Pesquisa Gartner (2018); Gartner and Barckleys Capital Estimate (2018), ambos institutos de pesquisa de mercado do segmento de eletrônicos.

Tabela 23 - Custo total da impressora (j) - \$ (em Reais)

<b>Custos</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Plástico</b>		
CV procurement i(t)	\$ 27,13	\$ 26,52
NPV sucata i (t)	\$ 4,76	\$ 4,76
<b>Valor do Plástico</b>	<b>\$ 31,89</b>	<b>\$ 31,28</b>
<b>PCB (Placas Eletrônicas)</b>	<b>\$ 9,13</b>	<b>\$ 9,13</b>
<b>Conectores</b>	<b>\$ 5,23</b>	<b>\$ 5,23</b>
<b>Automação</b>	<b>\$ 33,39</b>	<b>\$ 33,39</b>
Mecanismo de Impressão + Motor	\$ 33,39	\$ 33,39
<b>Acessórios e Insumos</b>	<b>\$ 38,18</b>	<b>\$ 38,18</b>
Cabo de Alimentação AC	2,78	2,78
Fonte de Alimentação	7,12	7,12
Cabo de Transmissão de Dados	5,57	5,57
Cartucho	22,26	22,26
Embalagem & Manual	0,45	0,45
<b>Mão de Obra (MOD)</b>	<b>\$ 11,13</b>	<b>\$ 11,13</b>
<b>Custo Overhead</b>	<b>\$ 3,34</b>	<b>\$ 3,34</b>
<b>Depreciação</b>	<b>\$ 3,40</b>	<b>\$ 3,40</b>
		\$ -
<b>Custo Total</b>	<b>\$ 135,68</b>	<b>\$ 135,07</b>

Fonte: Autor

#### 4.2.3 ELCC

Essa parte da contextualização será o cálculo do ELCC, que será internalizado às externalidades ao longo do ciclo de vida, juntamente com o seu cálculo LCC.

#### 4.2.3.1 Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto

Para iniciar as análises ELCC, utilizaremos as informações de emissão e consumo de combustível para um caminhão VUC (o mais utilizado em centros urbanos). Utilizando essa premissa, é possível projetar a estimativa de redução de emissão de CO<sub>2</sub> na cadeia logística, conforme a Tabela 24. Esses dados foram coletados através de consulta no Autodata (2018) e na entrevista.

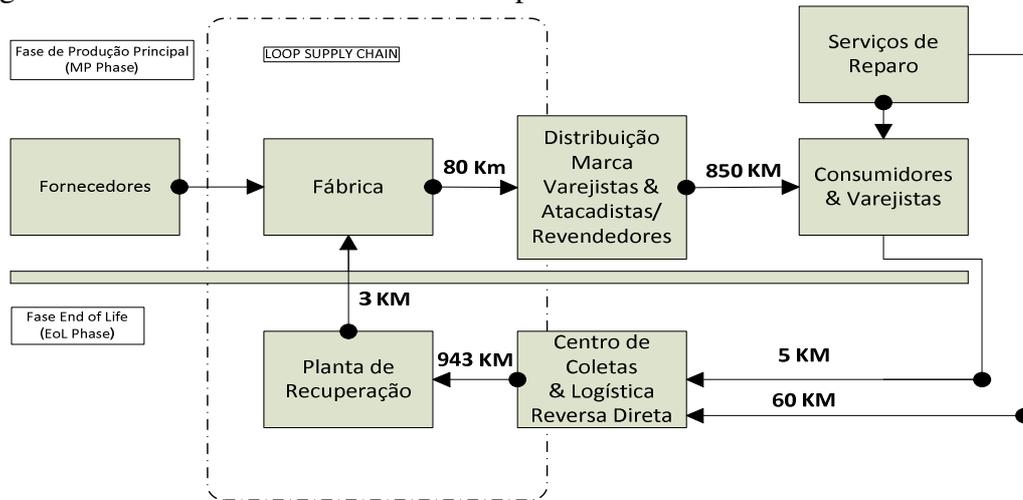
Tabela 24 – Dados de Emissão de CO<sub>2</sub>

<b>Externalidade</b>	<b>VUC</b>	
<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>	3,4	KgCO <sub>2</sub> /litro
<b>km/l –VUC</b>	5,5	lts/km
<b>Impressoras – QTD</b>	336,0	Unidades

Fonte: Autor

Além do benefício econômico, a redução de CO<sub>2</sub> agrega valor à estratégia de sustentabilidade da empresa, beneficiando o meio ambiente e agregando valor a sua operação e produto. Afim de se internalizar a externalidade para o cálculo do ELCC, o CO<sub>2</sub> e todo o ciclo de vida do produto será mostrado na Figura 30. Nota-se que, nesse mapa, as externalidades estão sendo consideradas em todo o ciclo de vida do produto, juntamente com o RV (volume de sucata enviada ao processamento – 21,60% – RV) e na operação de distribuição e redistribuição dos varejistas, dos centros de distribuição para suas lojas, conforme demonstrado na Figura 30. Utilizando os dados colhidos na pesquisa, foram coletadas as distâncias médias realizadas na operação da empresa, com o intuito de se calcular a emissão de CO<sub>2</sub> gerada durante o ciclo de vida da lata pela quantidade de 1 impressora.

Figura 30 - Análise do ciclo de vida da impressora - Emissões de CO2



Fonte: Autor

Tabela 25 - Análise de emissões de CO2 durante o ciclo de vida da impressora

Externalidade	Impressora	
Emissão de CO2	3,4	KgCO2/litro
km/l –VUC	5,5	lts/km
Distância	1.881,0	Km
Consumo	342,0	Lts
Emissão de CO2 Total	1.166,2	kgCO2
Impressoras/Caminhão	336,0	Unidades
Emissão de CO2 por unidade	3,5	kgCO2

Fonte: Autor

Ciclo de Vida		Distância (Km)
21,60% RV	Planta	3
	Recicladora	
Distribuição	Fabricante	80
	CD Varejista	
Re Distribuição	CD Varejista	850
	Loja (Hipermercado)	
Utilização & Descarte	Utilização	5
	Centro de Serviço	60
	Descarte	943
	Coleta	
		<b>1.941</b>

Fonte: Autor

#### 4.2.3.2 Internalização e a união do LCC

O próximo passo é internalizar a externalidade do CO<sub>2</sub> para o cálculo do ELCC. Na Europa, segundo o BNDES (2018) e o Esquema Europeu de Comércio de Emissões (ETS), o preço médio mensal de emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada é de € 8,90 – em janeiro de 2018, com taxa de dólar a R\$ 3,20 (BACEN, 2018). Com o intuito de se internalizar essa externalidade, ou seja, contabilizá-la no ELCC, serão utilizados esses valores como referência para a aplicação da Equação 3, conforme elaborado por Miah (2017). Na tabela 26, serão realizados essa internalização e o cálculo do ELCC, considerando o custo de descarte como 0.

$$T_{ELCC} = \sum_{\text{Matérias Primas}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Manufatura}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Frete LCC}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Descarte}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Externalidade}} C_n X_n \quad (3)$$

Tabela 26 - Cálculo do ELCC para 1 impressora

<b>Custos</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Plástico</b>		
CV procurement i(t)	\$ 27,13	\$ 26,52
NPV sucata i (t)	\$ 4,76	\$ 4,76
<b>Valor do Plástico</b>	<b>\$ 31,89</b>	<b>\$ 31,28</b>
<b>PCB (Placas Eletrônicas)</b>	<b>\$ 9,13</b>	<b>\$ 9,13</b>
<b>Conectores</b>	<b>\$ 5,23</b>	<b>\$ 5,23</b>
<b>Automação</b>	<b>\$ 33,39</b>	<b>\$ 33,39</b>
Mecanismo de Impressão + Motor	\$ 33,39	\$ 33,39
<b>Acessórios e Insumos</b>	<b>\$ 38,18</b>	<b>\$ 38,18</b>
Cabo de Alimentação AC	2,78	2,78
Fonte de Alimentação	7,12	7,12
Cabo de Transmissão de Dados	5,57	5,57
Cartucho	22,26	22,26
Embalagem & Manual	0,45	0,45
<b>Mão de Obra (MOD)</b>	<b>\$ 11,13</b>	<b>\$ 11,13</b>
<b>Custo Overhead</b>	<b>\$ 3,34</b>	<b>\$ 3,34</b>
<b>Depreciação</b>	<b>\$ 3,40</b>	<b>\$ 3,40</b>

		\$	-
<b>Custo Total</b>	\$	<b>135,68</b>	\$ <b>135,07</b>
<b>Externalidade</b>			
Emissão de CO2 (g)			3582
<b>US\$ 0,0890/kg</b>		\$	<b>0,32</b>
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>			
Frete - LCC (KM)		\$	<b>15,33</b>
<b>1.941</b>			
<b>Total ELCC</b>	\$	<b>135,68</b>	\$ <b>150,72</b>

Fonte: Autor

### 4.3 LINHA BRANCA

Nessa contextualização de linha branca serão abordadas: a (i) análise do negócio circular; (ii) a análise LCC; e (iii) a análise ELCC, conforme previamente indicado no desenvolvimento do protocolo de pesquisa.

#### 4.3.1 Análise do modelo de negócio circular

O estudo sobre essa contextualização é referente à unidade de negócio de um fabricante global de compressores para refrigeração, que é apontado pela Fundação Ellen MacArthur (2017) como referência no estado da arte de modelos de negócios sobre economia circular. Esse fabricante, a partir de uma unidade de negócio, oferece soluções de reciclagem, gestão sustentável de resíduos e logística reversa, a fim de gerar valor e transformar o mercado de refrigeração e eletroeletrônicos, incentivando a economia circular a seus clientes. A unidade de negócios, além de fornecer essas prestações de serviços, também oferece uma consultoria em gestão de resíduos, com atuação em nível global.

Essa unidade de negócios nasceu em 2014, devido ao anseio do fabricante de compressores em acelerar o crescimento da companhia, através de novas frentes de negócio, se diferenciando na oferta de produtos e serviços que agregassem maior valor a seus clientes. Além desses objetivos, outra grande motivação foi o estabelecimento dessa unidade de negócio para à adequação da PNRS (lei nº 12.305/10), conforme descrito anteriormente no caso de eletrônicos.

Durante a elaboração do plano estratégico da empresa; as fundamentações dos pilares estratégicos foram a (i) excelência na operação de reciclagem de eletrodomésticos e a (ii) Natureza. A inspiração pela natureza se deu, pois, na natureza nada é descartado, tudo se transforma, recicla e revive em outras formas e funções. Esse conceito se aproxima do modelo teórico de economia circular *Cradle to Cradle*, abordado durante a revisão teórica do trabalho.

Além dos compressores e da linha branca, essa unidade de negócios passou a reciclar produtos de linha verde, linha marrom e linha azul e passou a oferecer a seus clientes também o serviço de gestão de resíduos. Dentre os produtos atendidos de cada linha estão: (i) refrigeradores, fogões, máquina de lavar (linha branca); (ii) *desktop*, monitor, celular, *tablet* (linha verde); (iii) televisores e aparelhos de áudio como *microsystem* (linha marrom); e (iv) secadores de cabelo, batedeira, liquidificador (linha azul). Entre seus clientes estão alguns dos maiores fabricantes brasileiros de linha branca e grandes empresas dos segmentos de sorvetes e refrigerantes no Brasil.

A unidade de negócios garante a seus clientes: (i) a descaracterização do produto; o (ii) descarte correto de seus componentes; a (iii) rastreabilidade durante todo o processo; e o (iv) atendimento às normas ambientais. A empresa possui um grande *know-how* na gestão de resíduos na área de compressores e motores elétricos, reciclando todos os tipos de compressores e motores elétricos de forma a garantir a correta destinação ambiental para todos os resíduos gerados após a transformação, como (i) desmontagem completa, (ii) destinação correta, (iii) logística customizada e (iv) atendimento às normas ambientais.

Nos últimos anos, a unidade de negócios evoluiu significativamente e deixou de ser um projeto para se tornar uma área de negócio global, atuando além do Brasil, como prestador de serviços de consultoria na Europa e na América do Norte. Sua consultoria realiza gestão de sucata industrial, onde se faz um mapeamento de todos os materiais gerados no processo produtivo da empresa, afim de se gerar receita financeira no curto prazo através da separação racional dos resíduos e desenvolvimento de novos parceiros.

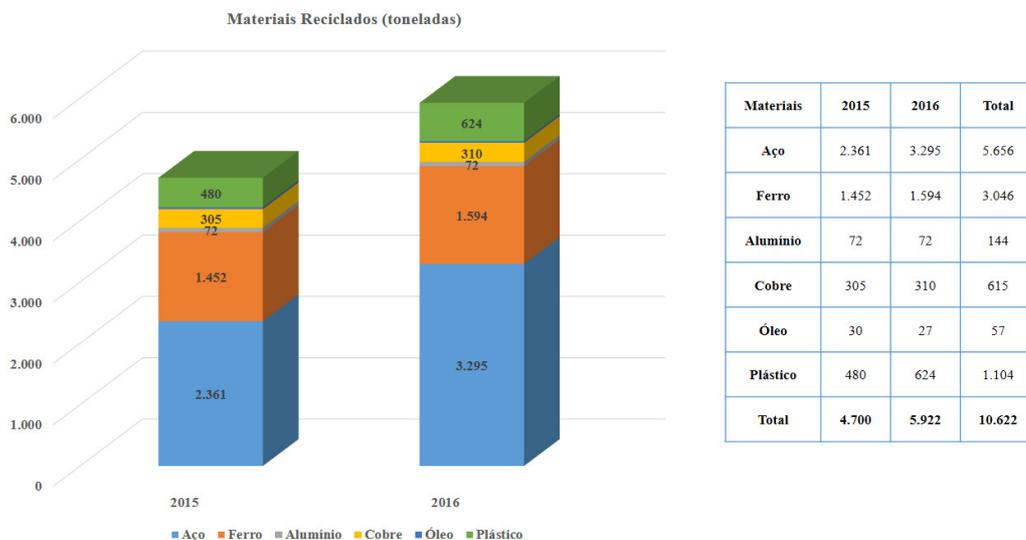
Além de processar e destinar a sucata dos refrigeradores e outros equipamentos eletrônicos de seus clientes, a unidade de negócio presta o serviço de logística reversa, auxiliando os seus clientes nos requisitos da PNRS, conforme demonstrado pelo gestor de resíduos na contextualização de eletrônicos (impressoras), porém foi ressaltada a confidencialidade da publicação sobre em quais requisitos da PNRS o gestor de resíduos dos refrigeradores auxilia os seus clientes.

No relatório de sustentabilidade do fabricante de compressores, a unidade de negócios divulgou as quantidades de materiais destinados à reciclagem (tanto utilizados em seu processo

interno como destinados à terceiros) nos anos de 2015 e 2016. Os resultados são mostrados na Figura 31. Em sua operação destinada a eletrônicos, as quantidades de reciclagem em 2015 e 2016 somam 10.000 toneladas de resíduos eletrônicos. Nota-se que referente ao fluido refrigerante e outras peças, devido à quantidade ser muito pequena, esses índices não são mostrados no gráfico pela unidade de negócio.

Durante a visita realizada, foram divulgados os resultados dos benefícios ambientais e sociais. Através de uma análise de ACV (Análise de Ciclo de Vida) ou LCA (*Life Cycle Assessment*), a unidade de negócio levantou os dados referentes à economia de emissões de gases de efeito estufa (GEE), conforme mostrado na Figura 32. Para análise LSCA, o único indicador fornecido pela unidade de negócio foi a geração de emprego de 76 pessoas e mais empregos indiretos gerados pela operação de logística reversa, porém a unidade fabril de compressores emprega em torno de 5 mil pessoas localmente e mundialmente beneficia mais de 100 mil pessoas.

Figura 31 – Quantidades de materiais de refrigeradores reciclados em 2015 e 2016



Fonte: Autor

Os programas sociais criados e mantidos pelo grupo têm como foco as áreas de educação e saúde, com trabalhos voltados para crianças e adolescentes, adequados a cada contexto cultural. Seus investimentos sociais são focados em: (i) programas e projetos sociais próprios; (ii) projetos de organizações da sociedade civil e governos; (iii) patrocínios institucionais; (iv) programas de voluntariado. A empresa recebeu um prêmio devido às boas práticas do Pacto Global, da Organização das Nações Unidas (ONU), foi agraciada com os prêmios Eco, Câmara

Americana de Comércio, e Expressão de Ecologia, e inclui no currículo apresentações em conferências de educação ambiental dentro e fora do Brasil.

Figura 32 – Análise LCA de emissões de GEE

Emissão de GEE	1 Refrigerador	15 Mil Refrigeradores
Energia	-152 KgCO <sub>2</sub> eq	-2.280 KgCO <sub>2</sub> eq
Equivalência	Consumo de 3 Refrigeradores	Consumo de 50 Mil Refrigeradores

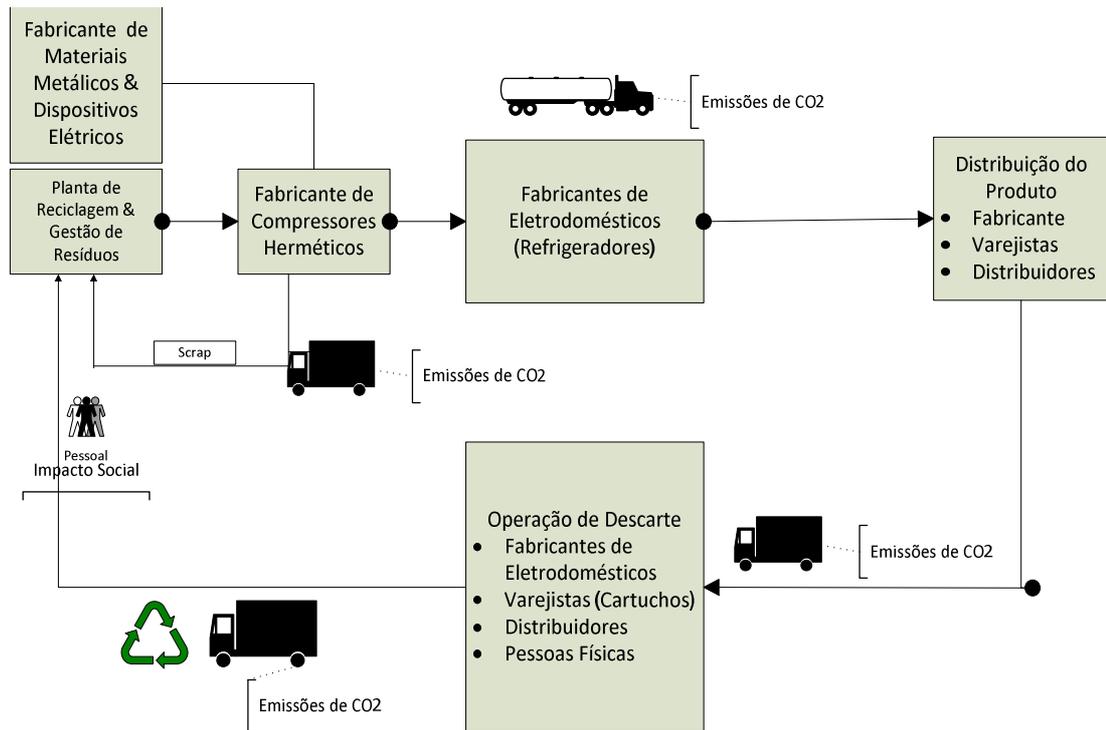
Emissão de GEE	Operação	
	Reciclagem	Reuso
Aço	-1.600 KgCO <sub>2</sub> eq	-2.200 KgCO <sub>2</sub> eq
PU (Poliuretano)	Coprocessamento 0 KgCO <sub>2</sub> eq	Reciclagem -3.650 kgCO <sub>2</sub> eq

Fonte: Autor

Durante a visita de campo, foram levantados os dados primários sobre o modelo de negócio circular do compressor. A fábrica de compressores é responsável pela fabricação do compressor e gestão de resíduos e a fábrica de eletrodomésticos é responsável pela fabricação, distribuição (principal) e a assistência técnica. Nota-se que alguns varejistas possuem uma operação de assistência técnica, porém esse reparo é parcial no produto e somente grandes varejistas possuem esse tipo de operação. Os refrigeradores são encaminhados ao descarte devido a problemas de qualidade na fabricação e na assistência técnica do fabricante e dos varejistas. Esses equipamentos são coletados pela unidade de negócio do fabricante de compressor, porém refrigeradores oriundos de aterro e outros locais ainda não são coletados por eles. A unidade de negócios opera com uma frota terceirizada com capilaridade a nível nacional. Na operação de geladeiras e compressores, entre 80 e 90% do volume é proveniente da região sul e sudeste.

Baseando-se nessas informações, a análise de negócio circular dos refrigeradores, juntamente com todos os *stakeholders*, está representada na Figura 33.

Figura 33 – Cadeia de fornecimento ciclo fechado do compressor para refrigeradores



Fonte: Autor

Os *stakeholders* possuem as responsabilidades na cadeia em ciclo fechado:

- a) Fabricantes de metais e dispositivos
  - Responsável pela fabricação do lingote de ferro, alumínio e chapas de aço.
  - Responsável pela fabricação de tubos de cobre e sua reciclagem.
  - Responsável pela fabricação de dispositivos elétricos e outras peças.
  - Responsável pela entrega do material.
- b) Fabricantes de compressores herméticos.
  - Responsável pelo processamento do metal para fundição de peças do motor, conformação da carcaça e fabricação do estator.
  - Responsável pela montagem do compressor.
  - Responsável pela operação logística do compressor ao fabricante de eletrodomésticos.

- c) Fabricante de eletrodomésticos
  - Responsável pela fabricação do refrigerador e suas unidades
  - Responsável pela distribuição do produto.
  - Responsável pelo gerenciamento do material de retorno dos varejistas, atacadistas, distribuidores.
  - Responsável pela assistência técnica do material.
- d) Distribuição – fabricante de eletrodomésticos, varejistas, atacadistas e distribuidores
  - Responsável pela promoção e venda do produto ao consumidor final.
  - Responsável pela assistência técnica parcial do produto.
- e) Unidade de negócios de compressores (gestão de resíduos & logística reversa)
  - Responsável pela coleta no fabricante e na distribuição dos refrigeradores.
  - Responsável pela separação e gestão dos materiais do refrigerador.
  - Responsável pela logística e comercialização de sucata a parceiros específicos.

Na etapa da contextualização dos cálculos e de demonstração do LCC e ELCC, será analisado o compressor hermético da unidade de refrigeração, que possui uma potência de  $\frac{1}{4}$  de HP para essa aplicação.

### **4.3.2 LCC**

Essa seção abordará o desenvolvimento do LCC, apoiado pela ferramenta PSILA, integrado a análise de negócio, a fase EoL, a fase MP e o cálculo do custo.

#### ***4.3.2.1 Operação de gestão de resíduos (EoL)***

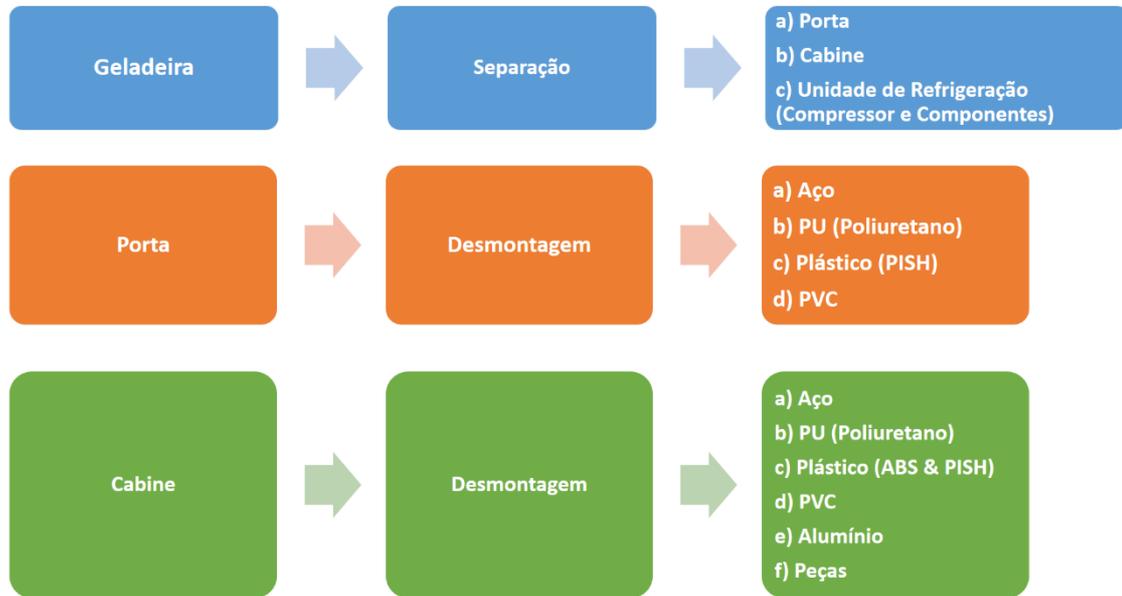
A operação fabril da unidade de negócios opera dentro de uma das estruturas do parque fabril da empresa de compressores. Para essa contextualização, será abordada a operação de desmontagem da linha branca, dos refrigeradores. A fim de se entender a operação de desmontagem, será demonstrado o processo de gestão de resíduos do refrigerador.

Conforme descrito anteriormente, os refrigeradores para descartes são oriundos das empresas fabricantes de linha branca. Atualmente, a empresa não realiza a prospecção de refrigeradores descartados em aterros. Os refrigeradores enviados para descarte vêm de processos de produção (não aprovados no processo de qualidade), assistência técnica e materiais danificados em clientes dos fabricantes, como distribuidores e varejistas. Através da operação de logística reversa, o produto é coletado e destinado à unidade fabril de gestão de resíduos.

Após a entrada dos produtos na expedição da empresa, é realizada a desmontagem do refrigerador. Ocorre uma segregação em três partes: (i) porta, (ii) cabine e (iii) unidade de refrigeração. Após essa segregação, cada parte é encaminhada a operação específica de desmontagem. A porta (i) possui materiais distintos, como (a) chapa de aço (lâmina frontal do refrigerador), (b) poliuretano interno (espuma interna da porta), (c) plástico de PISH (estrutura traseira da porta) e (d) plástico PVC (vedação para o fechamento da porta da cabine). A cabine (ii) possui materiais como (e) chapas de aço (estrutura lateral do refrigerador), (f) chapas de alumínio (estrutura interna do refrigerador), (g) poliuretano interno (espuma interna da porta), (h) plásticos ABS e PISH (estrutura interna e compartimentos internos) e (i) plástico PVC (vedação para o fechamento da porta da cabine). A operação de desmontagem do refrigerador, da porta e da cabine e seus respectivos materiais está demonstrada na Figura 34. Como o objetivo dessa contextualização é o compressor, o processo de desmontagem da unidade de refrigeração será demonstrado posteriormente.

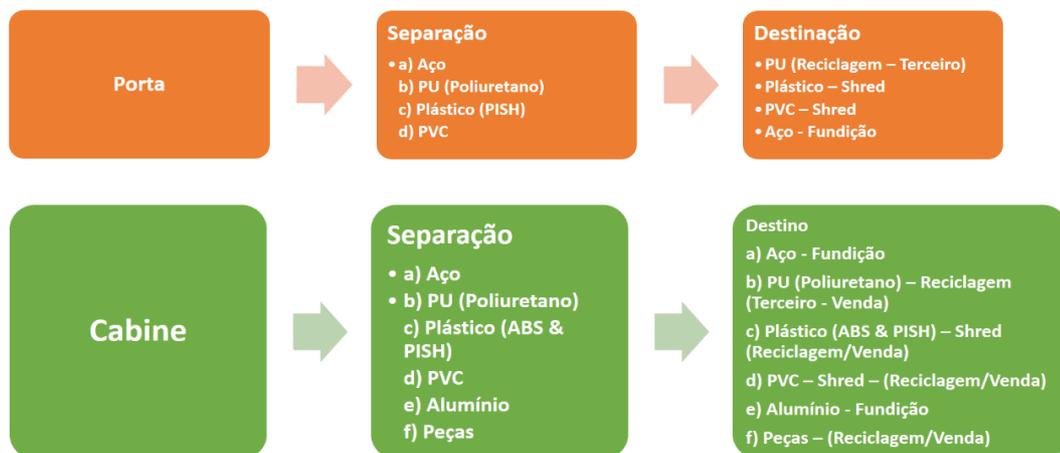
Após a separação dos materiais da porta e da cabine, os materiais são destinados individualmente. Os materiais idênticos da porta e da cabine são agrupados para a mesma destinação. Os metais – aço e alumínio – são destinados à fundição interna da operação da fábrica de compressores. Materiais como os plásticos ABS, PISH e PVC são destinados ao *shred*, ou moinho, onde são triturados para a reciclagem em terceiros. O poliuretano é somente separado e agrupado em contêineres, porém não é destinado ao *shred*, pois é requisitado pelas empresas terceiras que reciclam e o reaproveitam. Por razões de confidencialidade a empresa solicitou para não descrever as finalidades das empresas terceiras que utilizam esses materiais. A estrutura de destinação dos materiais da porta e cabine está representado na Figura 35.

Figura 34 – Processo geral de desmontagem do refrigerador



Fonte: Autor

Figura 35 – Processo geral de destinação dos materiais da porta e cabine do refrigerador



Fonte: Autor

Após a representação do processo de desmontagem da porta e cabine, será apresentado o processo de desmontagem da unidade de refrigeração. Conforme demonstrado na Figura 33, a unidade de refrigeração é inicialmente separada da cabine e da porta. Para que se possa entender melhor o processo de separação das subunidades que compõem a unidade de refrigeração, será demonstrado o processo de funcionamento de uma unidade de refrigeração. A unidade de refrigeração é composta pelo compressor, unidade de evaporação, filtro secador, unidade de controle (capilar) e unidade condensadora. Todas subunidades são interligadas

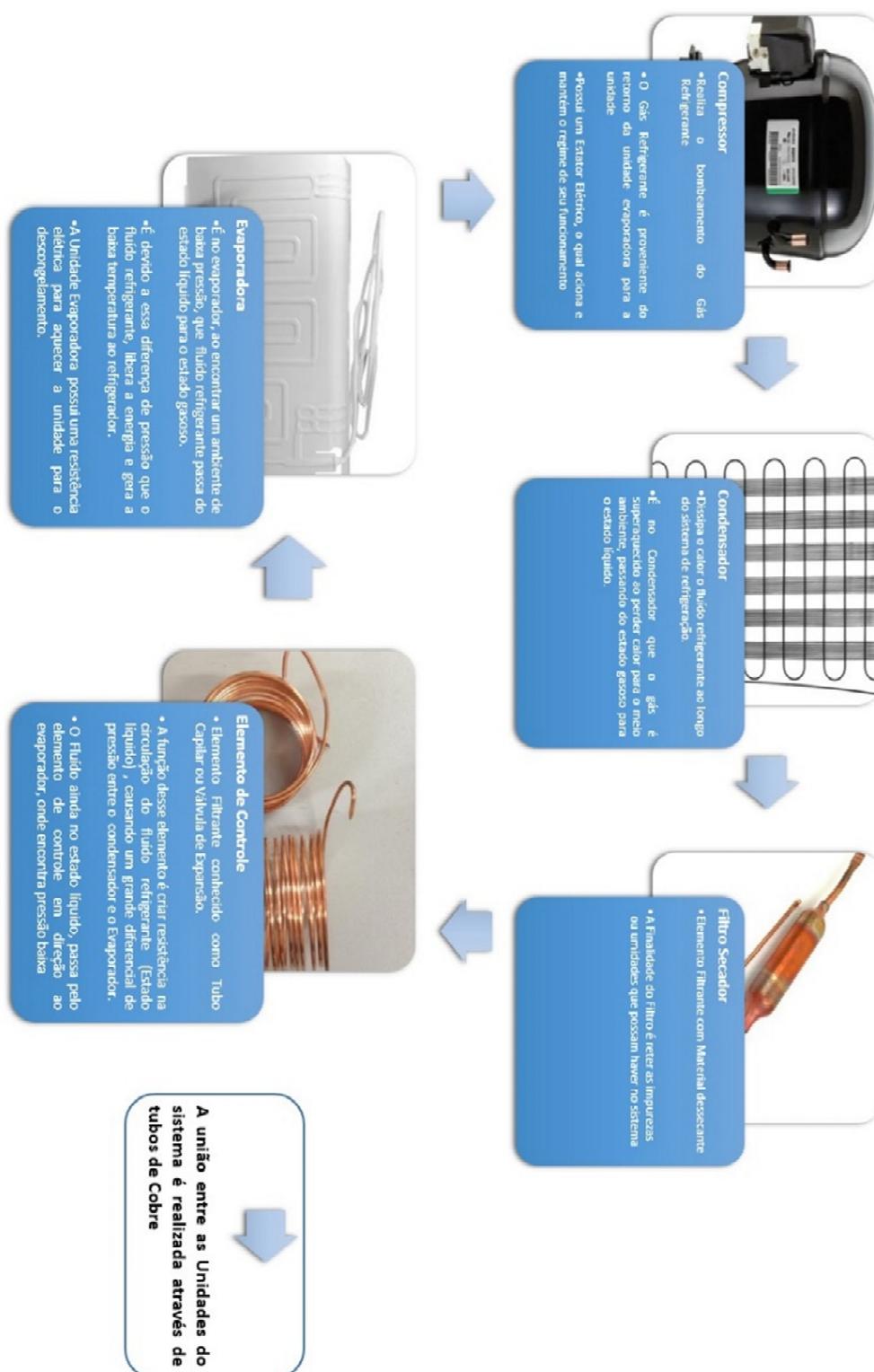
através de um tubo de cobre, o qual transporta o fluido refrigerante em estados físico, gasoso e líquido. De uma maneira geral, o compressor é um motor, que através de um pistão realiza a circulação do fluido refrigerante para todas as subunidades, criando diferenças de temperatura e pressão para o fluido refrigerante. Durante essa circulação, através de diferenças nas trocas de calores e pressões entre as unidades refrigeradoras, condensadora, unidade de controle e evaporadora, é gerado o resfriamento no refrigerador. O compressor possui um estator elétrico (bobina de cobre enrolada em um núcleo laminado de ferro) que realiza o movimento do pistão dentro do motor e esse mesmo dispositivo é acionado e desligado para manter a temperatura de refrigeração previamente configurada pelo usuário. Os controles de acionamento e desligamento são realizados através de controles elétricos de acionamento (relê), partida ou carga (capacitor) e sensores de temperaturas (termostato) e um sistema de proteção elétrico. Para um melhor entendimento como todo o processo funciona em uma unidade de refrigeração, na Figura 36 foi representada cada subunidade individualmente, conforme sua função no sistema.

Após a representação do funcionamento da unidade de refrigeração, durante a entrevista e a visita na operação fabril da unidade de negócios, três pontos foram destacados para o funcionamento do sistema de refrigeração: (i) o compressor necessita ser hermético, ou seja, fechado para circulação do fluido refrigerante em sua forma gasosa; (ii) todas as interligações do sistema necessitam ser soldadas para que não haja o vazamento do fluido refrigerante, tanto em seu estado gasoso ou líquido; e (iii) para funcionamento do compressor, é necessário a adição de óleo lubrificante para garantir o movimento entre as partes e não gerar travamentos no funcionamento em regime de operação.

Devido a essa particularidade do sistema, a desmontagem da unidade de refrigeração é realizada através de etapas específicas. A primeira etapa, conforme mencionada anteriormente, é a (i) separação de toda unidade da cabine do refrigerador. A segunda etapa é a (ii) separação dos químicos, através da coleta do fluido refrigerante e o óleo interno do motor do compressor. A coleta do fluido refrigerante (estado gasoso) é realizada através de uma bomba à vácuo, a qual é conectada em um dos terminais auxiliares do compressor. Para a coleta do óleo lubrificante, a carcaça metálica do compressor é dessoldada através de um equipamento específico, e após essa operação o óleo lubrificante residual é coletado. Ambos, os fluidos refrigerantes e o óleo lubrificante são reciclados por empresas fabricantes de fluidos e óleo, pois ambos os produtos químicos possuem composições que possibilitam o processo de reciclagem por essas empresas. Após essa separação dos químicos, a terceira etapa é a (iii) separação das

subunidades da unidade de refrigeração. Cada subunidade é dessoldada, pois possui itens que serão separados e armazenados conforme seu tipo de material para a correta destinação.

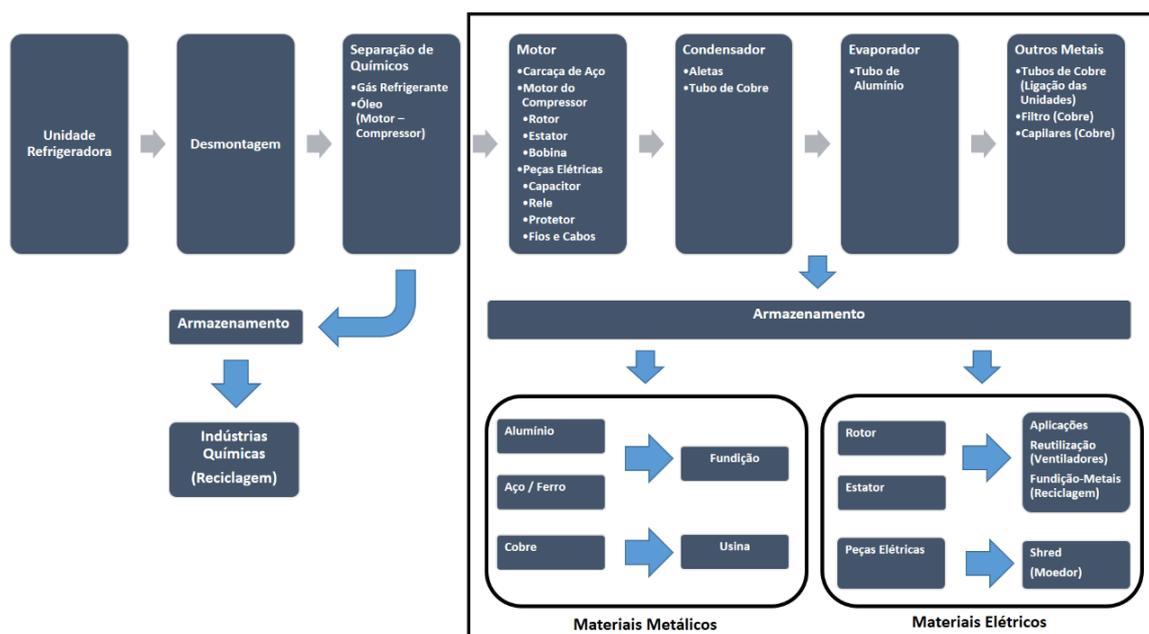
Figura 36 – Sistema de refrigeração do eletrodoméstico



O motor do compressor possui os seguintes itens (carcaça de aço), motor e eixo do compressor (ferro), rotor do motor e palheta (alumínio), estator (núcleo laminado de ferro e enrolamento de cobre), peças elétricas e outros materiais. A unidade condensadora possui tubos de cobre que circulam através de duas estruturas laterais de chapa de aço, com aletas de alumínio para auxiliar na dissipação de calor. Os filtros secadores e os elementos de controle (capilar) são fabricados através de tubos e materiais de cobre, e a unidade condensadora é fabricada através de chapa de alumínio e componentes elétricos. Após a separação de cada subunidade, a terceira etapa é o (iii) armazenamento, quando cada componente é separado e reagrupado conforme sua característica, por exemplo, metais de acordo com sua composição metálica e dispositivos (peças elétricas) conforme sua atuação.

Após a separação de todos os componentes, as partes metálicas e peças específicas possuem diferentes destinos. Um caso de sucesso da unidade de negócios é a venda do estator para outras indústrias de eletrodomésticos como ventiladores e outras indústrias de motores. Elas podem utilizar o estator como elemento do motor para suas aplicações. Outros materiais metálicos que possuem a composição de ferro, aço e alumínio são destinados à fundição interna da fábrica de compressores. Os dispositivos elétricos, devido a possuírem sua maior composição plástica, são destinados ao *shred* (moedor). O processo de desmontagem da unidade de refrigeração é representado pela Figura 37.

Figura 37 - Sistema de desmontagem da unidade de refrigeração



Fonte: Autor

#### ***4.3.2.2 Processo principal de produção (MP)***

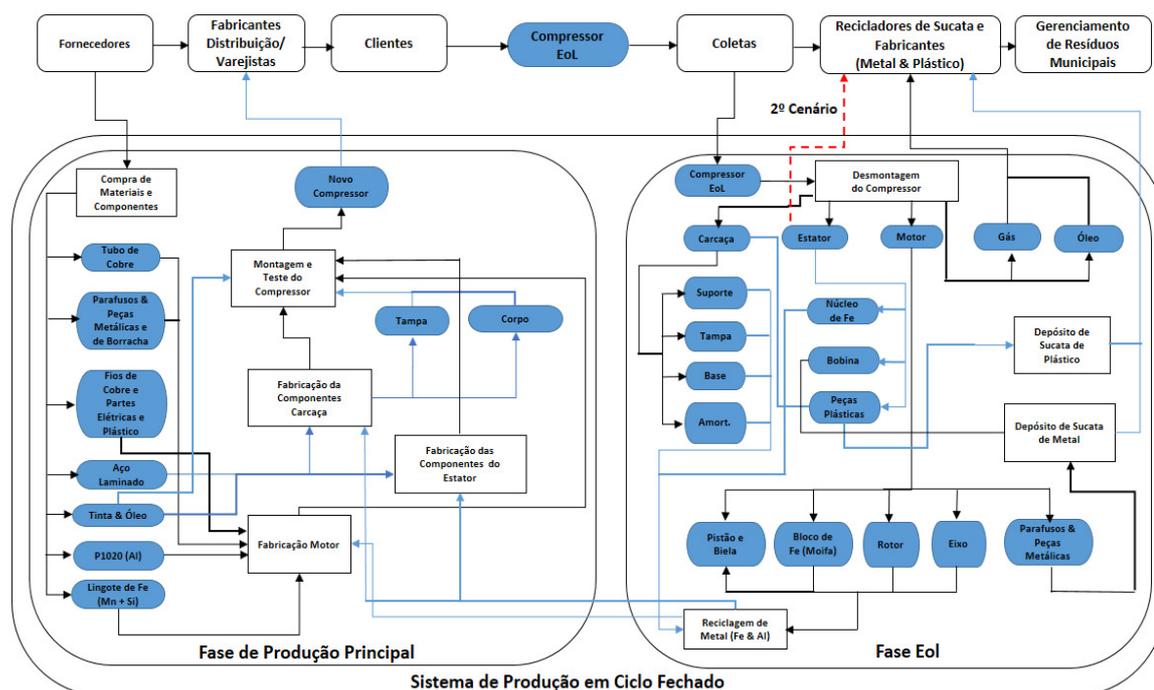
O processo produtivo do compressor hermético utilizado na unidade de refrigeração do refrigerador possui etapas relacionadas às peças principais do compressor. Essas peças são: (i) bloco do motor, responsável pelo compartimento da mufla de sucção e descarga – a circulação do gás entre esses compartimentos é realizada através de um pistão; (ii) rotor, o qual é acionado eletricamente para o giro do pistão; (iii) estator, que é responsável pelo movimento do rotor através da geração de campo magnético pela corrente elétrica aplicada na bobina de cobre do estator; e (iv) carcaça, responsável pela proteção, selamento e ligação do compressor no sistema, para que não haja nenhuma danificação e vazamento de gás durante sua operação.

Tanto o bloco do motor e o rotor do motor são fabricados através do processo de fundição do ferro e alumínio. O núcleo laminado do estator contém 60 unidades de chapas laminadas de ferro cortadas a laser para que a bobina de cobre seja enrolada no núcleo a fim de que haja geração do campo magnético e consequente movimentação do rotor. A carcaça do compressor é proveniente de um processo de estampagem de chapas de aço carbono laminadas; posteriormente é aplicada uma pintura para proteção contra a corrosão em ambientes externos. A Figura 38 demonstra a representação do processo produtivo do compressor hermético, juntamente com a respectiva matéria-prima utilizada para cada peça. Os materiais que são utilizados em ciclo fechado proveniente da sucata do compressor da unidade de negócios do fabricante de compressores herméticos são o bloco de ferro, o rotor e a carcaça. O estator possui um valor de mercado para a revenda e raramente pode ser aproveitado devido a sua configuração de potência e aplicação conforme o tipo de compressor. Com base nessas informações, pode-se estruturar a cadeia de fornecimento em ciclo fechado integrado ao seu ciclo de vida, conforme representado na Figura 39.

Com base nessas análises, podemos estruturar o ciclo fechado e utilizar seu conceito conforme representado na Figura 40.



Figura 40 – Sistema de produção em ciclo fechado integrado ao ciclo de vida



Fonte: Autor

Após a descrição do processo produtivo, integrado ao seu ciclo de vida, para se realizar o cálculo LCC (apoiado pela ferramenta PSILA), a próxima etapa é levantar os dados referentes ao (i) peso de material, (ii) conteúdo reciclado e (iii) à taxa de geração de sucata no processo produtivo.

Durante a visita realizada ao gestor de resíduo e aos distribuidores dos compressores e peças de refrigeração, foi descrito pelos responsáveis técnicos que os materiais utilizados nas peças para a fabricação de compressores são: (i) lingote de ferro (bloco); (ii) aço laminado (núcleo do estator e carcaça); (iii) lingote de alumínio ou P1020 (rotor e palheta). O peso das peças metálicas por material está representado na Tabela 27.

Tabela 27 – Peso das peças metálicas por material do compressor hermético

Material por Compressor	Peso de Peças (kg)	Peças
Fe (lingote)	5,84	Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo
Aço Laminado (Carbono)	4,56	Carcaça
Aço Laminado (Carbono)	3,06	Núcleo de Fe (Estator)
Al (P1020 - Lingote)	1,39	Rotor e Palheta

Fonte: Autor

14,85

Devido às razões de confidencialidade solicitadas pelas empresas, foram levantados os dados médios de (i) taxa de geração de sucata na fabricação de peças, (ii) conteúdo reciclado médio do compressor hermético, demonstrado nas tabelas 28 e 29.

Tabela 28 – Taxa de geração de sucata por peças metálicas do compressor hermético

Material		Peças	Geração de Sucata %	Peso da Sucata /Compressor (kg)
Puro	Fe (lingote)	Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo	5,00%	0,29
	Aço Laminado (Carbono)	Carcaça	21,60%	0,98
	Aço Laminado (Carbono)	Núcleo de Fe (Estator)	21,60%	0,66
	Al (P1020 - Lingote)	Rotor e Palheta	5,00%	0,07
			<b>13,52%</b>	<b>2,01</b>

Fonte: Autor

Tabela 29 – Conteúdo reciclado média do compressor hermético

			Material de Processo	Reciclado (Qty em Ciclo Fechado - EoL)
			97%	3%
Material por Compressor	Peças	Peso de Peças (kg)	Peso de Peças (kg)	Peso de Peças (kg)
Fe (lingote)	Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo	5,84	5,66	0,18
Aço Laminado (Carbono)	Carcaça	4,56	4,42	0,14
Aço Laminado (Carbono)	Núcleo de Fe (Estator)	3,06	2,97	0,00
Al (P1020 - Lingote)	Rotor e Palheta	1,39	1,35	0,04
		<b>14,85</b>	<b>14,40</b>	<b>0,35</b>

Fonte: Autor

Analisando os dados coletados, nota-se que a taxa de sucata total (RV<sub>i(t-1)</sub>) proveniente no compressor hermético é a soma da taxa de sucata gerada no período anterior (t-1) mais a sucata (conteúdo reciclado) proveniente da gestão de resíduos. Esse cálculo pode ser observado

na Tabela 30. Como o resultado dessa somatória, se obtém a taxa de sucata total (RV  $i(t-1)$ ) de 2,361 kg, resultando em uma taxa de RV (%) de 16,39% em relação ao peso total do compressor – 14,85 kg, conforme observado na Tabela 31. A obtenção dessa taxa é um dado importante, pois será utilizado como comparativo de custo de material, sem o conteúdo reciclado, pois seu RV  $i(t-1)$  é 2,01 kg e seu RV (%) é de 13,52%.

Tabela 30 - Taxa de geração de sucata total (RV  $i(t-1)$ )

Material	Peças	Geração de Sucata % - Processo	Peso da Sucata /Compressor (kg)	Peso de Peças (kg)	Total de Sucata	
Puro	Fe (lingote)	Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo	5,00%	0,292	0,175	0,467
	Aço Laminado (Carbono)	Carcaça	21,60%	0,985	0,137	1,122
	Aço Laminado (Carbono)	Núcleo de Fe (Estator)	21,60%	0,661	0,000	0,661
	Al (P1020 - Lingote)	Rotor e Palheta	5,00%	0,069	0,042	0,111
			<b>2,007</b>	<b>0,354</b>	<b>2,361</b>	

Fonte: Autor

Tabela 31 - Taxa de geração de sucata total RV (%)

<b>Geração Total de Conteúdo Reciclado (kg)</b>	<b>2,361</b>
<b>RV <math>i(t-1)</math> - % de Sucata Total</b>	<b>16,39%</b>

Fonte: Autor

#### 4.3.2.3 Estruturação completa da informação do produto, mapa de ciclo de vida do produto

Conforme destacado anteriormente, durante a pesquisa e os levantamentos de dados realizados em campo, a implementação da EC na operação de manufatura dos compressores herméticos inicialmente objetivou-se para o atendimento dos requisitos do PNRS, como a contextualização da impressora; porém, além desse fator, a grande motivação foi a criação de

uma nova unidade de negócios que pudesse prestar serviços aos seus clientes, agregando-lhes valor.

Como citado anteriormente, no caso de embalagens de alumínio e impressoras, um grande fator que catalisa a inovação é o custo. Para esse caso, esse fator será analisado aplicando o método LCC, entre a diferença do custo da matéria-prima pura (adicionando a taxa da geração de sucata interna, conforme descrito na Tabela 28) e a matéria-prima pura e reciclada dos compressores (adicionando além a taxa de geração de sucata interna, a sucata proveniente da operação de gestão de resíduos, conforme a Tabela 30). Segundo as informações da pesquisa, a média de conteúdo reciclado do compressor hermético é de 3%.

Um ponto importante a ser ressaltado é que as peças, por sua maioria de composição metálicas, foram agrupadas em conjuntos de materiais, conforme a Figura 42. Devido a esse fator, será demonstrada a estrutura completa de informação do produto (1) em duas situações: completa (Figura 43) e agrupada (Figura 41). O mapa do ciclo de vida integrado do produto (iii) será baseado na estrutura completa de informação de produtos, agrupado em conjuntos de materiais, conforme demonstrado na Figura 42. Baseando-se nas informações da revisão da literatura e as informações descritas anteriormente no ciclo produtivo, as estruturas dos itens estão demonstradas nas figuras 40, 41 e 43.

Figura 41 - Completa estrutura de informação do produto agrupado em materiais metálicos para o compressor hermético

Mainstream Production Phase						End-of-Life Phase (2ª Opção)									
Peças			Número da Peça	Descrição da Peça - BOM	PBM(i) (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça	Opção de Est.		Eficiência da Sucata	Peças			Descrição Qualitativa da Peça Est.	PBM(i) (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça
j	i	k					Fabricante	3rd (Gestor de Resíduos)		k	i	j			
1			1	Compressor (1/4 HP - 127V)	1	Unidade	Recuperação & Revenda	Recuperação	98%			1	Compressor Recondicionado	1,00	Unidade
			2	Motor	7,3	Kgs	Reciclagem Interna		98%				Compressor Não-Vendável		
			3	Bloco de Ferro	5,8	kgs	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%				Sucata de Metal Grade A	5,84	kgs
			4	Bloco de Alumínio	1,4	Kgs	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%				Sucata de Metal Grade A	1,39	Kgs
			5	Tubo de Cobre	0,1	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	98%				Sucata de Metal Grade A	0,06	Kgs
			6	Outros Metais e Borrachos	0,0	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	98%				Sucata de Metal Grade A	0,01	Kgs
			7	Estator	3,4	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)		100%					3,40	Kgs
			8	Núcleo de Fe	3,060	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Peça de Motor Grade A	3,06	Kgs
			9	Bobina de Cobre	0,340	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Peça de Motor Grade A	0,34	Kgs
			10	Caixa	4,8	Kgs	Reciclagem Interna		98%					4,80	Kgs
			11	Tampa, Base e Suporte de Montagem (Aço Laminado)	4,6	Kgs	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%				Sucata de Metal Grade B	4,56	Kgs
			12	Amortecedor	0,2	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	98%				Sucata de Metal Grade B	0,19	Kgs
			13	Soldo (Terminal/Junção Hermética)	0,05	Kgs	%	(Material perdido durante a abertura)	0%					0,05	Kgs
			14	Peças Elétricas (Terminais e Cabo Cluster)	0,05	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Sucata de Plástico	0,05	Kgs
			15	Tubo de Sucção (Entrada - Baixa Pressão)	0,03	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Sucata de Plástico	0,03	Kgs
			16	Tubo de Processo (Saída Alta Pressão)	0,03	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Sucata de Plástico	0,03	Kgs
			17	Tubo de Descarga	0,03	Kgs	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Sucata de Plástico	0,03	Kgs
			18	Óleo de Lubrificação do Motor	300	ml	Venda de Peça (3ª Part)	Venda de Peça (3ª Part)	100%				Sucata de Plástico	300	ml

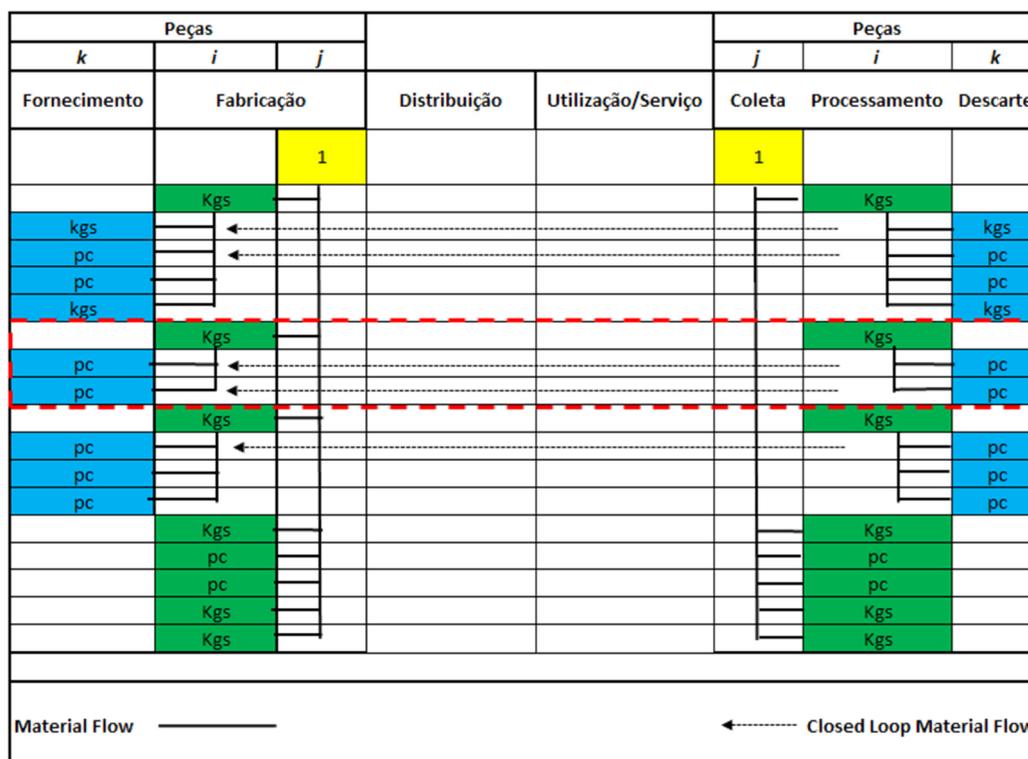
Fonte: Autor

Figura 43 - Completa estrutura de informação do produto completa para o compressor hermético

Mainstream Production Phase						End-of-Life Phase			
Peças			Número da Peça	Descrição da Peça - BoM	PR <sub>mp(i)</sub> (Taxa de Peça - Peça/Parte)	Unidade por peça	Opção de Eol		Eficiência da Sucata
j	i	k					Fabricante	3rd (Gestor de Resíduo)	
1			1	Compressor (1/4 HP - 127V)	1	Unidade	Recuperação & Revenda	Recuperação	98%
(Nest)		kgs	2	Motor	1	pc	Reciclagem Interna	Reciclagem Interna	100%
(Child)			3	Palheta e Cabeçote da Válvula (Al)	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			4	Bloco do Pistão (Muflo de Sucção e Descarga) - Fe	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			5	Tampa da Muflo	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			6	Pistão (Fe)	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			7	Eixo Excêntrico + Biela do Pistão (Fe)	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			8	Rotor (Al)	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			9	Eixo do Rotor (Fe)	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			10	Limitador de Movimento do Rotor	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			11	Tube de Contrapeso e Lubrificação	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			12	Serpentina + Mola (Solda Baixa Pressão) - Cu	2	pcs	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	98%
(Child)			13	Mola de Suspensão	4	pcs	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	98%
(Child)			14	Parafusos e Arruelas	6	pcs	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	98%
(Nest)		kgs	15	Estator	1	pc	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%
(Child)			16	Núcleo Laminado (60 Lâminas)	1	pc	Revenda	Revenda	100%
(Child)			17	Bobina de Partida	1	pc	Revenda	Revenda	100%
(Child)			18	Bobina de Regime	1	pc	Revenda	Revenda	100%
(Nest)		pc	19	Carcaça	1	pc	Reciclagem Interna	Reciclagem Interna	98%
(Child)			20	Tampa	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			21	Base	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			22	Suporte de Montagem	1	pc	Reutilização em Ciclo Fechado	Reutilização em Ciclo Fechado	98%
(Child)			23	Amortecedor	4	pcs	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	Venda de Sucata de Metal (3º Part)	98%
(Child)			24	Solda (Terminal/ Junção Hermética)	1	pc	%	%	%
(Child)		kgs	25	Peças Elétricas (Terminais e Cabo Cluster)	4	pcs	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%
(Nest)		pc	26	Tube de Sucção (Entrada - Baixa Pressão)	1	pc	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%
(Nest)		pc	27	Tube de Processo (Saída Alta Pressão)	1	pc	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%
(Nest)		kgs	28	Tube de Descarga	1	pc	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%
(Nest)		kgs	28	Óleo de Lubrificação do Motor	1	pc	Revenda	Venda de Peça (3º Part)	100%

Fonte: Autor

Figura 42- Mapa do ciclo de vida integrado do compressor hermético



Fonte: Autor

#### 4.3.2.4 Custeio da matéria prima em ciclo fechado e a integração no custo completo do produto

Conforme estruturado nas figuras 42, 43 e 44, após elaborar o sistema conceitual de produção de ciclo fechado e o sistema completo de informação de produto, cria-se uma orientação a fim de elaborar do custo direto de produção da matéria-prima. Utilizando-se a teoria do PSLIA para determinar como base o volume de produção necessário para a fabricação das peças metálicas em ciclo fechado, pode-se determinar que as fórmulas 23, 24, 25 e 26, as mesmas que foram aplicadas para os estudos de latas de alumínio e impressoras, poderão ser aplicadas para o estudo de peças metálicas para o compressor hermético, baseando-se nas fórmulas 4, 5, 6 e 7 da fundamentação teórica do PSILA.

$$PV = OV - RV \quad (23)$$

$$OV = OV_{i(t)} \cdot PR_{mp} \frac{k}{i(t)}, \quad i \# \{\text{root} = j\} \quad (24)$$

$$RV = RV_{i(t-1)} \cdot PR_{eol} \frac{k}{i(t-1)} \cdot OF \cdot Bcl, \quad i \# \{\text{root} = j\} \quad (25)$$

$$Bcl, i = \begin{cases} 1, & \forall \in \{\text{ciclo fechado}\} \\ 0, & \forall \notin \{\text{ciclo fechado}\} \end{cases} \quad (26)$$

Onde:

- a) PV = Volume de compra de material (metálica) da peça i;
- b) OV = Volume de produção de peças metálicas (j), tendo sua componente no tempo t;
- c) RV = Volume de peças (i) sucateadas para recuperação, tendo sua componente durante o tempo t-1;
- d) PR mp = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por peça (j) no tempo t;
- e) PR eol = Volume de material (k) da peça (i) por compressor (j) gerado durante a fase de produção no tempo t-1;
- f) OF = Perda fracionária do material k;
- g) Bcl = Variável binária, onde 1 a peça (i) está em ciclo fechado e 0 a peça não está em ciclo fechado.

Como citado anteriormente e analisado pelo diagrama e o sistema completo de informação de produto, durante o processo de produtivo das peças do compressor é gerado uma taxa média de 13,52% de sucata de metal durante o *Mainstream Production Phase*, ou Processo Principal de Produção de Peças Plásticas. Quando a sucata de metal (ferro, aço e alumínio) é inserida no processo de fundição, há uma perda de 2%, ou seja, um retorno de 98% da sucata coletada durante o processo produtivo e reciclagem (OF), o mesmo valor utilizado para o alumínio e aço, no caso da lata, e para o plástico, no caso da impressora. Outro ponto importante é que os materiais em ciclo fechado são oriundos de um período anterior (neste caso, o período de estudo temporal é mensal). Isso se deve ao período necessário de processamento da sucata pela reciclagem. Nesse caso, iremos adotar 1 mês ou 30 dias de produção (t-1), o que é similarmente adotado pela manufatura de reciclagem do plástico e da lata.

Para se exemplificar uma aplicação do modelo matemático descrito anteriormente, pode-se considerar uma produção de 5.000 unidades de compressores, por exemplo, durante o mês atual ou período t, para esse caso, caso haja material processado anteriormente em ciclo fechado – produção do mês anterior (t-1) de 5.000 unidades e RV (13,52%) de 676 unidades de volume de sucata –, conforme demonstrado na Tabela 28. Como o peso do bloco de ferro (i) do compressor (j) é de 5,84 kg (PR mp k/i) e a sucata gerada por cada peça (bloco - i) por compressor (j) como RV i x PR eol k/i, obtém-se o seguinte resultado:

$$PV i(t) = 5.000 \times 5,84 (OV) - 676 \times 5,84 \times 98\% \times 1(RV)$$

$$PV i(t) = 25.331 \text{ kgs ou } 25,33 \text{ toneladas}$$

Padronizando a metodologia que utilizamos para a lata de alumínio e a impressora, o segundo passo é o dimensionamento do custo variável direto da matéria prima metálica em ciclo fechado. Ressalta-se novamente que, na revisão teórica, Low et al. (2014) descrevem que os custos variáveis totais de um material em ciclo fechado é a somatória dos custos variáveis de *procurement* ou compra de materiais, fabricação, distribuição, serviços, coleta, processamento e descarte/sucata. Novamente, nesse estudo de caso será abordada somente a análise do custo de matéria-prima metálica, que são as fases de *procurement* ou compra de matéria-prima e descarte da sucata. Para essas duas fases, pode-se estruturar as equações de acordo com a revisão da literatura: equações 27, 28, 29 e 30 – as mesmas equações utilizadas para a lata de alumínio e impressora, conforme as equações 8, 12 e 18. Nota-se que a sucata é oriunda de um tempo anterior (t-1) ou tempo de produção atual (t), sendo necessário contabilizá-la no custo da matéria prima em valor presente.

$$CV_{i(t)} = CV_{\text{procurement } i(t)} + NPV_{\text{sucata } i(t)} \quad (27)$$

Os custos de compra de sucata podem ser representados nas mesmas equações utilizadas para a lata alumínio e a impressora; que são as equações 28 29 e 30:

$$CV_{\text{procurement } i(t)} = PV_{i(t)} \cdot PR_{mp} \frac{k}{i(t)} \cdot P_{\text{metal},k(t)} \quad (28)$$

Onde;

- OV = Volume de produção por peça (i) no tempo t;
- PR mp = Volume de material (k) da peça (i) durante a fase de produção principal (mp) por compressor (j) no tempo t;
- P metal = Preço de compra da matéria-prima metálica (ferro, aço e alumínio - k) no tempo i(t).

$$NPV_{\text{sucata},i(t)} = \frac{CV_{\text{sucata},i(t-1)}}{(1-d)^t} \quad (29)$$

$$CV_{\text{sucata},i(t-1)} = RV_{i(t-1)} \cdot PR_{eol} \frac{k}{i(t-1)} \cdot OF \cdot P_{\text{proces},k(t-1)} \quad (30)$$

Onde:

- RV = Volume de peças (i) sucateadas para recuperação durante o tempo t-1;
- PR eol = Volume de material (k) da peça (i) por compressor (j) gerado durante a fase de produção no tempo t-1;
- OF = Perda de fração (Ex. Al – fusão no forno de fundição) do material k;
- P proces = Preço ou custo de transformação da sucata em matéria prima reutilizável (ferro, aço ou alumínio) no tempo i (t-1) pela reciclagem do metal ou terceiro Reciclador;
- d = Custo financeiro do estoque da sucata.

Antes de se exemplificar os custos das peças metálicas (i) para o compressor (j) com as equações elaboradas anteriormente, é muito importante o entendimento da composição do custo da matéria metálica (P metálico k). Foi realizada uma pesquisa de preço com os principais

fornecedores de compressores e peças de unidades de refrigeração relacionados a essas empresas de reciclagem de metal no período de agosto de 2018. A dinâmica do preço dos metais é muito similar à do alumínio, apresentada na primeira contextualização. Os preços estão relacionados na Tabela 32.

Tabela 32 – Preços médios dos metais para fundição e conformação de peças mecânicas

Material		Preço
Puro	Fe (lingote)	R\$ 2,22
	Aço Laminado (Carbono)	R\$ 7,70
	Al (P1020 - Lingote)	R\$ 8,45

Material	Valor - Sucata	Preço Transformação (Líquido)
Fe (lingote)	R\$ 0,50	R\$ 1,72
Aço Laminado (Carbono)	R\$ 0,50	R\$ 7,20
Al (P1020 - Lingote)	R\$ 4,00	R\$ 4,45

Fonte: Autor

Para a operação de reciclagem em ciclo fechado, a unidade de negócios dos compressores (gestor de resíduos) administra a sucata metálica e recicla o metal diretamente no forno de fundição da empresa e somente terá o custo de transformação da sucata de metal e para o aço laminado; a operação será similar às contextualizações anteriores. A sucata do aço laminado será enviada à siderurgia e transformada novamente em bobina ou chapa. Porém, em ambos os processos de reciclagem (fundição e laminação) existe uma perda de fusão, denominada no modelo matemático como OF (*Outgoing Fraction*), conforme explicado anteriormente, e será necessário contabilizá-la a fim de se dimensionar a quantidade de produção e o custo da peça metálica.

Após a descrição dos custos da matéria prima metálica, para se iniciar a análise é necessário considerar duas premissas que foram descritas anteriormente. A primeira premissa é a definição das variáveis  $t$ , a qual será considerada como uma produção de unitária para o tempo  $t$  (mês atual) e uma produção para o tempo anterior ( $t-1$ ) de 1, afim de visualizar o benefício da utilização do material em ciclo fechado para ambos materiais; e a segunda é o mix de material a ser comparado. Conforme descrito inicialmente, essa comparação será realizada conforme a pesquisa de campo nas operações de manufatura: (i) as composições das peças metálicas com matéria pura mais sucata, proveniente do processo interno; e (ii) as composições das peças metálicas com matéria pura mais a sucata proveniente do processo interno, adicionada

à sucata do gestor de resíduos, conforme descrito nas tabelas 28, 29, 30 e 31. Serão considerados esses dois cenários de peças metálicas: (i) peças com material puro (P1); e (ii) peças com material puro mais conteúdo reciclado (P2). Nota-se que, para esses dois cenários, não haverá alteração de peso, conforme demonstrado na Tabela 33, porém somente haverá alteração no conteúdo de sucata (RV), conforme demonstrado na Tabela 34.

Tabela 33 - Peso de peça metálica por material (i/k) por compressor (j)

Peso por Compressor (kg)*	Peças	Material	Peso por Compressor	
			P1 Kg	P2 Kg
PR mp k/i (t) (kg)	Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo	Fe	5,84	5,84
PR eol k/i (t-1) kg				
PR mp k/i (t) (kg)	Carcaça	Aço Laminado	4,56	4,56
PR eol k/i (t-1) kg				
PR mp k/i (t) (kg)	Núcleo de Fe (Estator)	Aço Laminado	3,06	3,06
PR eol k/i (t-1) kg				
PR mp k/i (t) (kg)	Rotor e Palheta	Al	1,39	1,39
PR eol k/i (t-1) kg				
PR mp k/i (t) (kg)	Compressor	Metal (Fe+Aço+Al)	14,85	14,85
PR eol k/i (t-1) kg				

Fonte: Autor

Tabela 34 - Produção OV i (t) e RV i (t-1) para uma PV i (t) (produção) de 1 compressor – aplicação das fórmulas 23, 24 e 25.

	Material	Material
	P1	P2
PV i(t)	1	1
RV	13,52%	16,39%
PV i(t-1)	1	1
OF	98%	98%
RV i(t-1)	0,13	0,16
OV i(t)	0,87	0,84

Fonte: Autor

A próxima etapa de cálculo é a definição dos custos da matéria prima metálica e os custos de processamento de sucata para cada material (P process k), conforme demonstrado na Tabela 35, 36 e 37. A partir das análises dos quadros anteriores, obtém-se o valor das variáveis para o cálculo dos custos. Dois pontos importantes são: (1) a variável P proces k (t) será considerada igual ao seu período anterior (t-1), pois no período da pesquisa realizada seus valores eram idênticos; e (2) o custo financeiro  $d$  é de 1,98% a.m. ou ao período t (t = mês) para atualização do custo em valor presente.

Tabela 35 - Custo de aquisição de material – CV procurement i(t) – Fórmula 28

		<b>Material</b>	
		<b>Compressor</b>	
		<b>P1</b>	<b>P2</b>
	<b>OV i(t)</b>	0,87	0,84
<b>Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo</b>	<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	5,84	5,84
	<b>P metal</b>	R\$ 2,22	R\$ 2,22
	<b>CV procurement i(t)</b>	<b>R\$ 11,25</b>	<b>R\$ 11,25</b>
<b>Carcaça</b>	<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	4,56	4,56
	<b>P metal</b>	R\$ 7,70	R\$ 7,70
	<b>CV procurement i(t)</b>	<b>R\$ 35,11</b>	<b>R\$ 35,11</b>
<b>Núcleo de Fe (Estator)</b>	<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	3,06	3,06
	<b>P metal</b>	R\$ 7,70	R\$ 7,70
	<b>CV procurement i(t)</b>	<b>R\$ 23,56</b>	<b>R\$ 23,56</b>
<b>Rotor e Palheta</b>	<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	1,39	1,39
	<b>P metal</b>	R\$ 8,45	R\$ 8,45
	<b>CV procurement i(t)</b>	<b>R\$ 11,73</b>	<b>R\$ 11,73</b>
<b>Compressor</b>	<b>CV procurement i (t)</b>	<b>R\$ 81,65</b>	<b>R\$ 81,65</b>

Fonte: Autor

Tabela 36 - Custo de aquisição de material – CV sucata i(t-1) – Fórmula 30 &amp; NPV sucata – Fórmula 29

		<b>Material</b>	
		<b>Compressor</b>	
		<b>P1</b>	<b>P2</b>
	<b>RV i(t-1)</b>	0,13	0,16
<b>Bloco do Mufla, Pistão e Biela e Eixo</b>	<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	5,84	5,84
	<b>P process</b>	R\$ 1,72	R\$ 1,72
	<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>R\$ 10,04</b>	<b>R\$ 10,04</b>
<b>Carcaça</b>	<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	4,56	4,56
	<b>P process</b>	R\$ 7,20	R\$ 7,20
	<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>R\$ 32,83</b>	<b>R\$ 32,83</b>
<b>Núcleo de Fe (Estator)</b>	<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	3,06	3,06
	<b>P process</b>	R\$ 7,20	R\$ 7,20
	<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>R\$ 22,03</b>	<b>R\$ 22,03</b>
<b>Rotor e Palheta</b>	<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	1,39	1,39
	<b>P process</b>	R\$ 4,45	R\$ 4,45
	<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>R\$ 6,18</b>	<b>R\$ 6,18</b>
<b>Compressor</b>	<b>C sucata i(t-1)</b>	<b>R\$ 71,09</b>	<b>R\$ 71,09</b>

		<b>Material</b>	
		<b>Compressor</b>	
		<b>P1</b>	<b>P2</b>
	<b>RV i(t-1)</b>	<b>0,13</b>	0,16
	<b>PR eol k/i (t-1) kg</b>	14,85	14,85
	<b>C sucata i(i-1)</b>	R\$ 71,09	R\$ 71,09
	<b>C sucata t i(t-1)</b>	<b>R\$ 9,42</b>	<b>R\$ 11,42</b>

Fonte: Autor

Tabela 37 - Custo variável do material – CV Metal (j(t)) – Fórmula 27

<b>Material</b>				
<b>Compressor</b>				
	<b>P1</b>		<b>P2</b>	
<b>OV i(t)</b>	0,87		0,84	
<b>PR mp k/i (t) (kg)</b>	14,85		14,85	
<b>P Compressor</b>	R\$	81,65	R\$	81,65
<b>CV procurement i(t)</b>	<b>R\$</b>	<b>70,83</b>	<b>R\$</b>	<b>68,53</b>

<b>Material</b>				
<b>Compressor</b>				
	<b>P1</b>		<b>P2</b>	
<b>C sucata i(t-1)*</b>	9,42		11,42	
<b>D</b>	1,98%		1,98%	
<b>T</b>	2,00		R\$	2,00
<b>NPV sucata i (t)</b>	<b>9,80</b>		<b>11,89</b>	

<b>Material</b>				
<b>Compressor</b>				
	<b>P1</b>		<b>P2</b>	
<b>CV procurement i(t)</b>	70,83		68,53	
<b>NPV sucata i (t)</b>	9,80		11,42	
<b>CV Material (R\$/u)</b>	<b>80,63</b>		<b>79,95</b>	

Fonte: Autor

Considerando esse modelo matemático juntamente com as premissas levantadas anteriormente, obtém-se que o custo de matéria-prima metálica (P1) do compressor é aproximadamente 0,9% maior (R\$ 80,63 > R\$ 79,95) quando comparado ao custo de matéria-prima metálica com conteúdo reciclado.

Antes de demonstrar os custos completos dos compressores herméticos nos dois cenários, deve-se considerar dois pontos. O primeiro ponto, conforme citado anteriormente, é que (i) no ambiente de negócios dos compressores herméticos, o estator é vendido para outras indústrias a fim de o reutilizarem em outras aplicações de eletrodomésticos ou motores industriais. Conforme a pesquisa realizada nos distribuidores oficiais de compressores e peças de refrigeração, o custo de compra por essas indústrias é de R\$ 30,00. Esse custo de revenda é descontado no custo P2, pois nesse cenário o estator é coletado na operação de gestão de resíduos e revendido para as indústrias de eletrodomésticos ou motores industriais.

O segundo ponto é (ii) a definição dos custos de fabricação. Para a definição dos outros custos, como os custos variáveis e fixos para elaboração do custo total do compressor hermético, as premissas foram baseadas na pesquisa elaborada e publicada pelo Departamento

de Pesquisas e Estudos Econômicos do Banco Bradesco (DEPEC, 2017) para o setor de eletrodomésticos e eletroeletrônicos, na qual se ressaltam os percentuais das estruturas de custo, com base na pesquisa do setor pelo IBGE. A Tabela 38 demonstra o custo nos dois cenários (P1, P2) previamente estabelecidos.

Tabela 38 - Custo total do compressor hermético (j) - R\$ (em reais)

<b>Custos</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Metal</b>	<b>R\$ 80,63</b>	<b>R\$ 49,95</b>
CV Material (R\$/u)	R\$ 80,63	R\$ 79,95
<b>Venda - Peça (Estator)</b>		<b>- R\$ 30,00</b>
<b>Tubos de Cobre</b>	<b>R\$ 4,60</b>	<b>R\$ 4,60</b>
<b>Peças Elétricas e Outras partes</b>	<b>R\$ 3,00</b>	<b>R\$ 3,00</b>
<b>Óleo</b>	<b>R\$ 2,00</b>	<b>R\$ 2,00</b>
<b>Custo Total de Matéria-Prima</b>	<b>R\$ 90,23</b>	<b>R\$ 59,55</b>
<b>Mão de Obra (MOD)</b>	<b>R\$ 24,75</b>	<b>R\$ 24,75</b>
<b>Custo Overhead</b>	<b>R\$ 9,05</b>	<b>R\$ 9,05</b>
<b>Depreciação</b>	<b>R\$ 12,98</b>	<b>R\$ 12,98</b>
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 137,01</b>	<b>R\$ 106,33</b>

Fonte: Autor

### 4.3.3 ELCC

Essa parte da contextualização será o cálculo do ELCC, que será internalizado às externalidades ao longo do ciclo de vida, juntamente com o seu cálculo LCC.

#### 4.3.3.1 Levantamento das externalidades durante o ciclo de vida do produto

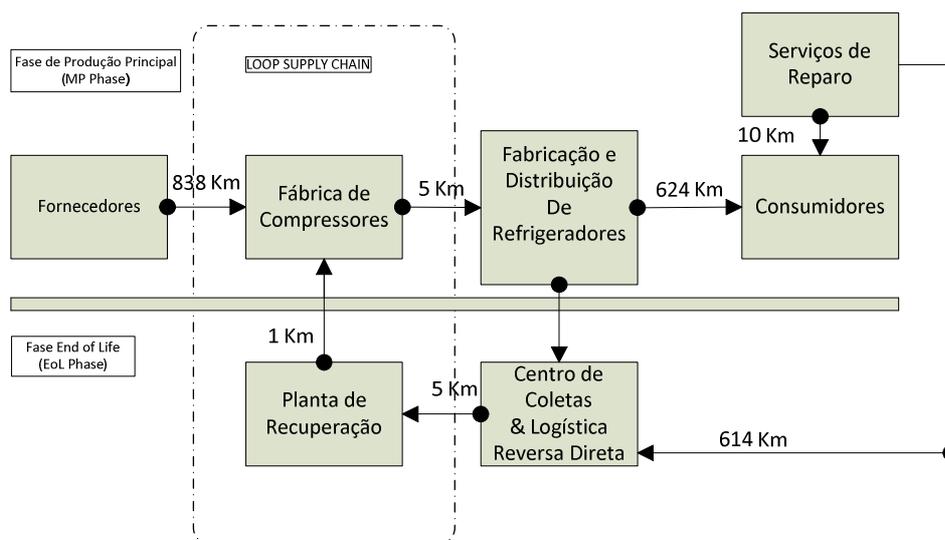
Para iniciar a análise ELCC, serão utilizadas as informações de emissão e consumo de combustível para um caminhão VUC (o mais utilizado em centros urbanos). Utilizando essa premissa, é possível projetar a estimativa de redução de emissão de CO<sub>2</sub> na cadeia logística, conforme a Tabela 39. Esses dados foram coletados através de consulta no Autodata (2018) e em distribuidores oficiais.

Tabela 39 – Dados de Emissão de CO<sub>2</sub>

Externalidade	VUC	
Emissão de CO <sub>2</sub>	3,4	kg CO <sub>2</sub> /litro
km/l –VUC	5,5	l/km
Refrigeradores – QTD	12	Unidades

Fonte: Autor

A fim de se internalizar a externalidade para o cálculo do ELCC, o CO<sub>2</sub> e todo o ciclo de vida do produto será mostrado na Figura 44, com base na estruturação da Figura 40, previamente apresentada. As informações referentes às distâncias em cada trecho do ciclo de vida foram coletadas durante a entrevista com o gestor de resíduos, baseando-se na localidade do maior fabricante de refrigeradores no Brasil, que está incluído em sua carteira de clientes.

Figura 44 - Análise do ciclo de vida do compressor - emissões de CO<sub>2</sub>

Fonte: Autor

Nota-se que nesse mapa as externalidades estão sendo consideradas em todo o ciclo de vida do produto, como a operação de RV (volume de sucata enviada ao processamento, no caso de chapa de aço), operação de distribuição e redistribuição dos varejistas, do centro de distribuição para suas lojas, conforme demonstrado na Figura 45. Baseando-se nos dados coletados durante a pesquisa, foram utilizadas as distâncias médias realizadas na operação da empresa, com o intuito de se calcular a emissão de CO<sub>2</sub> gerada durante o ciclo de vida do produto referente à quantidade de 1 compressor. A quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> está descrita na Tabela 40.

Tabela 40 - Análise de emissões de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de vida do compressor

<b>Externalidade</b>	<b>Compressor (Geladeiras)</b>	
<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>	3,4	KgCO <sub>2</sub> /litro
<b>km/l –VUC</b>	5,5	lts/km
<b>Distância</b>	2.097,0	km
<b>Consumo</b>	381,3	lts
<b>Emissão de CO<sub>2</sub> Total</b>	1.300,1	kgCO <sub>2</sub>
<b>Refrigeradores/Caminhão</b>	12,0	Unidades
<b>Emissão de CO<sub>2</sub> por unidade</b>	108,3	kgCO <sub>2</sub>

<b>Ciclo de Vida</b>		<b>Distância (Km)</b>
<b>13, 50% RV</b>	<b>Planta</b>	<b>838</b>
	<b>Recicladora</b>	
<b>Venda</b>	<b>Fabricante</b>	<b>5</b>
<b>Distribuição &amp; Utilização</b>	<b>Fabricante</b>	<b>624</b>
	<b>Loja (Hipermercado)</b>	
	<b>Utilização</b>	
<b>Descarte</b>	<b>Centro de Serviço</b>	<b>10</b>
	<b>Descarte</b>	<b>614</b>
	<b>Coleta</b>	<b>5</b>
	<b>Transferência</b>	<b>1</b>
		<b>2.097</b>

Fonte: Autor

#### 4.3.3.2 Internalização e a união do LCC

O próximo passo é internalizar a externalidade do CO<sub>2</sub> para o cálculo do ELCC. Na Europa, segunda o BNDES (2018) e o Esquema Europeu de Comércio de Emissões (ETS), o custo médio mensal de emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada é de € 8,90 – janeiro de 2018, taxa dólar em R\$ 3,20 (BACEN, 2018). Com o intuito de se internalizar essa externalidade, ou seja, contabilizá-la no ELCC, serão utilizados esses valores como referência para a aplicação da Equação 3, conforme elaborado por Miah (2017). Na Tabela 41, será realizada essa internalização e o cálculo do ELCC, considerando o custo de descarte como 0, pois a indústria de compressor não possui esse custo.

$$\begin{aligned}
 T_{ELCC} = & \sum_{\text{Matérias Primas}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Manufatura}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Frete LCC}} C_n X_{n+} \\
 & + \sum_{\text{Descarte}} C_n X_{n+} + \sum_{\text{Externalidade}} C_n X_n
 \end{aligned} \tag{3}$$

Tabela 41 - Cálculo do ELCC para 1 compressor

<b>Custos</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Metal</b>	<b>R\$ 80,63</b>	<b>R\$ 49,95</b>
CV Material (R\$/u)	80,63	79,95
<b>Venda - Peça (Estator)</b>		<b>(R\$ 30,00)</b>
<b>Tubos de Cobre</b>	<b>R\$ 4,60</b>	<b>R\$ 4,60</b>
<b>Peças Elétricas e Outras partes</b>	<b>R\$ 3,00</b>	<b>R\$ 3,00</b>
<b>Óleo</b>	<b>R\$ 2,00</b>	<b>R\$ 2,00</b>
<b>Custo Total de Matéria-Prima</b>	<b>R\$ 90,23</b>	<b>R\$ 59,55</b>
<b>Mão de Obra (MOD)</b>	<b>R\$ 24,75</b>	<b>R\$ 24,75</b>
<b>Custo Overhead</b>	<b>R\$ 9,05</b>	<b>R\$ 9,05</b>
<b>Depreciação</b>	<b>R\$ 12,98</b>	<b>R\$ 12,98</b>
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 137,01</b>	<b>R\$ 106,33</b>
<b>Externalidade</b>		
Emissão de CO2 (g)		108.345
<b>US\$ 0,0890/kg</b>		<b>R\$ 35,68</b>
Taxa Dólar - US\$ 1,00 - R\$ 3,70		
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>		
Frete - LCC (KM)		<b>R\$ 32,85</b>
<b>2.097</b>		
<b>Total ELCC</b>	<b>R\$ 137,01</b>	<b>R\$ 174,86</b>

Fonte: Autor

#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Essa pesquisa objetiva analisar modelos de negócios circulares em três mercados diferentes, analisando o custo de ciclo de vida (apoiado pela ferramenta PSILA) e integrando sua externalidade através do ELCC ou LCC ambiental. Nota-se que, primeiramente, cada negócio circular possui uma subjetividade, oriunda da especificação do material, estrutura de operação e ou da demanda de mercado. Essa seção abordará a discussão de resultados e futuras lacunas individuais para cada contextualização.

#### 4.4.1 Embalagens alimentícias

Na primeira contextualização, da (1) embalagem metálica alimentícia, notou-se que ambos materiais possuem características para implementação de estratégias de economia circular, porém os custos e benefícios variam de acordo com a eficiência do processo (quanto maior a taxa de geração de sucata no processo interno, maior o benefício econômico para a utilização do alumínio como matéria-prima). Referente à externalidade, um fator subjetivo da contextualização é que a diferença entre as densidades do material impacta diretamente a emissão de GEE, o consumo de combustível e o custo de frete. A Tabela 42 apresenta o resumo dos resultados apresentados para a elaboração do ELCC.

Tabela 42 – Resultados ELCC para embalagem alimentícia

<b>Custos</b>	<b>Alumínio</b>	<b>Aço (Folha de Flandres)</b>
<b>Custo Total</b>	<b>\$ 52,1069</b>	<b>\$ 71,2991</b>
<b>Externalidade</b>		
Emissão de CO2 (g)	\$ 22,1294	\$ 58,4550
US\$ 0,0890/kg	\$ 0,0020	\$ 0,0052
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>		
Frete - LCC (KM)	\$ 6,3250	\$ 7,9063
2.366		
<b>Total ELCC</b>	<b>\$ 58,4339</b>	<b>\$ 79,2105</b>

Fonte: Autor

Trazer a discussão e aplicação de métodos para segmentos como da embalagem de alumínio, que representa a segunda maior fonte mundial de sucata de alumínio, tem um papel fundamental no contexto que discute a transição de uma economia linear para a economia circular (NIERO; OLSEN, 2016). Segundo dados obtidos da usina de alumínio e da ABAL (2015), o mercado de embalagens de alumínio é composto basicamente de material laminado. O mercado de alumínio no Brasil é composto de 60% de material laminado; dentro do consumo de material laminado, 80% são direcionados ao segmento do mercado de embalagens.

Em um mercado competitivo, em que a demanda é elástica, o impacto inicial decisório para implementação da inovação pelo principal transformador e integrador do produto na cadeia, no caso a empresa alimentícia, é o custo direto em seu produto. Nesse modelo, o principal gestor e responsável pela inovação do produto é a indústria de alimento, que poderá

processar o seu alimento e projetar sua embalagem de diferentes modos. Os fornecedores de matérias-primas poderão suportar a empresa alimentícia em um “co-design” para implementação do material.

Os benefícios dessa inovação levantados durante a pesquisa de campo resultam em: (1) redução do custo direto da embalagem; (2) melhora da ergonomia na linha de produção devido ao manuseio de um material mais leve; (3) melhora da eficiência de peso na cadeia de distribuição do produto, venda para os grandes varejistas e para os atacadistas, os quais também revendem esses produtos para os supermercados de menores portes; e (4) emissão de um índice menor de CO<sub>2</sub> ao longo dessa cadeia de distribuição do produto (alimento enlatado), contribuindo para que o produto seja ambientalmente mais eficiente.

O estudo demonstra a utilização do alumínio como uma solução que pode prover benefícios aos *stakeholders* do modelo de negócio apresentado nesse estudo. Os benefícios foram quantificados como as reduções de custos diretos, benefícios de sustentabilidade (reciclagem e redução de emissão de CO<sub>2</sub>) e economia em ativos logísticos da empresa alimentícia, demonstrando de uma forma holística dos resultados obtidos.

Futuras pesquisas, referentes especificamente a essa contextualização, poderão endereçar qual é o nível de investimento necessário para transformar uma linha de produção de embalagem de aço para alumínio (ex.: modificação de ferramentas) e quanto tempo será necessário para o ROI, ou retorno do investimento, utilizando a diferença de preço entre o aço e alumínio como financiadores desse investimento. O impacto na elaboração do custo fixo também poderá ser abordado, conforme descrito na fundamentação teórica da ferramenta PSILA, nas equações 20, 21 e 22.

#### **4.4.2. Eletrônicos (impressoras)**

Na segunda contextualização referente aos eletrônicos nota-se que (i) o custo final da impressora oriunda de um modelo de negócio circular (P2) e não circular (P1) praticamente não tem impacto no custo final do produto – o grande impacto nota-se no ELCC. As externalidades que são internalizadas também não possuem impacto significativo, porém o grande impacto é no custo de Logística Reversa. A Tabela 43 demonstra os resultados da análise ELCC.

Tabela 43 – Resultados ELCC para eletrônicos (impressora) – em R\$

	P1	P2
<b>Custo Total (Impressora)</b>	<b>\$ 135,68</b>	<b>\$ 135,07</b>
<b>Externalidade</b>		
Emissão de CO2 (g)		3582
<b>US\$ 0,0890/kg</b>		<b>\$ 0,32</b>
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>		
Frete - LCC (KM)		<b>\$ 15,33</b>
<b>1.941</b>		
<b>Total ELCC</b>	<b>\$ 135,68</b>	<b>\$ 150,72</b>

Fonte: Autor

Analisando todo o contexto ELCC, somente pela abordagem dos resultados, a conclusão direta será que o contexto de negócio circular em todo seu ciclo de vida não possui nenhuma vantagem econômica. Porém, de acordo com as sentenças da PNRS (Apêndice B), será mandatória a responsabilidade da gestão de resíduos pelos fabricantes de produtos, apresentando operações que cumpram os requisitos da PNRS, juntamente com um plano de logística reversa. As instituições governamentais de fiscalização estaduais no Brasil, como a Cetesb, não autorizarão as licenças necessárias para liberação de operações tributárias, impedindo a operação da empresa no mercado.

Conforme abordado anteriormente na fundamentação teórica, o estudo de Huang et al. (2009) mostra a interação dos catadores e decompositores em um mercado de alto crescimento no mundo, especialmente na China e Japão: o mercado de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE). Devido à inovação tecnológica e *marketing* intensivo, a taxa de atualização e consumo de EEE cresce exponencialmente, juntamente com a diminuição de seu ciclo de vida. Como resultado, as quantidades de resíduos de PCBs (placas eletrônicas) estão dramaticamente aumentando. O Programa do Meio Ambiente da ONU estima que mundialmente gera-se anualmente em torno de 20 a 50 milhões de toneladas de resíduos elétricos e equipamentos eletrônicos (WEEE), e os montantes estão subindo três vezes mais rápido do que outras formas de resíduos urbanos.

No mercado de impressoras acontece outro fenômeno: programas de vendas ao consumidor final chamados como *Trade In* valorizam a impressora e cartuchos já utilizados para a compra de um modelo mais novos de impressoras e insumos (cartuchos de tinta), com a finalidade de se renovar o parque instalado e incentivar o crescimento no mercado. Devido a

esses contextos, pode-se supor que o investimento inicial aportado pela marca de eletrônicos, juntamente com o parceiro de fabricação e gestão de resíduos se direciona a três pilares: (i) PNRs; (ii) excelência operacional; e (iii) aumento de vendas e participação de mercado.

#### 4.4.3. Linha branca (compressores herméticos)

Na segunda contextualização referente à linha branca, especificamente aos compressores herméticos, nota-se que em relação ao custo de matéria prima, pode-se observar na contextualização, através da Tabela 37, que a comparação entre os modelos de negócio circular (P2) e não circular (P1) possuem leve diferença de custo: R\$ 80,63/u (P1) e R\$ 79,95/u (P2). Porém, no contexto do custo total do produto, o modelo de negócio circular (P2) torna-se atrativo, pois há a possibilidade da venda do estator, o qual possui um valor de recompra para reutilização em outras aplicações como ventiladores e outros maquinários.

Porém quando é analisado o ELCC; além do custo de logística reversa, as externalidades, uma vez internalizadas, serão significativas na composição total do custo de vida do compressor hermético. No entanto, haverá vantagem pela indústria de compressores referente ao custo de logística reversa, pois esse custo será de responsabilidade do fabricante de linha branca (refrigerador), o que proporciona uma redução no custo de ciclo de vida dos compressores. Conclui-se também que modelo de negócio não circular é somente utilizado como referência, pois ele não poderá ser mantido devido à mesma razão apresentada na contextualização dos eletrônicos, a PNRs. A Tabela 44 demonstra os resultados da análise ELCC.

Tabela 44 – Resultados ELCC para linha branca (compressores herméticos) – em R\$

<b>Custos</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 137,01</b>	<b>R\$ 106,33</b>
<b>Externalidade</b>		
Emissão de CO2 (g)		108.345
<b>US\$ 0,0890/kg</b>		<b>R\$ 35,68</b>
<b>Frete (Ciclo de Vida)</b>		
Frete - LCC (KM)		<b>R\$ 32,85</b>
<b>2.097</b>		
<b>Total ELCC</b>	<b>R\$ 137,01</b>	<b>R\$ 174,86</b>

Fonte: Autor

## CONTRIBUIÇÃO TEÓRICA E PRÁTICA

A lacuna apontada na literatura indica a importância do desenvolvimento e implementação de métodos de custeio do ciclo de vida sob a perspectiva do ciclo de vida do fluxo do produto/material. Aplicação numérica do PSILA integrado com as externalidades contribui para demonstrar como um método pode auxiliar na gestão de negócios circulares, conforme as lacunas discutidas por autores como Florindo et al. (2017), Almeida et al. (2017), Niero e Hauschild (2017), Hall (2015) e Bradley, Ryan et al. (2018). Portanto, a contribuição teórica desta pesquisa consiste em complementar o método PSILA, com as variáveis relacionadas aos custos de logística (ciclo de vida) e impacto de CO<sub>2</sub>. O método PSILA atende às lacunas que os métodos de LCC possuem na integração do ciclo de vida do produto em sistema circular, e a aplicação se mostra útil em *design* de sistemas como: (1) produtos com alta complexidade, como eletrônicos e linha branca; (2) na união das fases do sistema produtivo principal (*Mainstream Production System – MP*) com o sistema do final de vida do produto (*Eol – End of Life*), permitindo a captura dos custos do ciclo fechado em ambas as fases. Porém, o método PSILA não captura o custo do frete logístico e o impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, ao mapear o modelo de negócio identificando as variáveis para o cálculo do frete (ciclo de vida) e as emissões decorrentes da logística reversa, obtém-se um avanço em termos de métodos teóricos para uma melhor gestão dos modelos circulares. A segunda contribuição desta pesquisa está relacionada à perspectiva de entender como empresas estão gerindo seu ecossistema sob condições de baixa margem de lucratividade, contribuindo para o desenvolvimento de um *framework* de implementação de modelos de negócios circulares.

Observou-se que as empresas estão buscando formas alternativas de gerar resultados operacionais positivos, como o caso do modelo discutido para a linha branca, sendo trabalhado para atender não só clientes com menores volumes dentro desse segmento, mas também para adequar a operação de logística reversa para o atendimento de clientes nas linhas azul que trabalham com eletrodomésticos de pequeno porte. A pulverização dos clientes garantiu um grande incremento no volume de serviços de logística reversa e contribuiu positivamente para o aumento de receita. Neste ponto vale a ressalva da importância da aplicação do método PSILA, logística reversa e externalidade (CO<sub>2</sub>) de forma combinada para garantir de fato um equilíbrio econômico e ambiental.

O trabalho também contribui em nível prático, pois ajuda a quantificar, mensurar e apresentar uma metodologia para implementação de negócios e modelos circulares, auxiliando

como uma ferramenta de tomada de decisões em níveis gerenciais de negócio. Adicionalmente, o estudo contribui para o planejamento de empresas em decisões referentes às implicações das externalidades de CO<sub>2</sub>, oferecendo uma ferramenta para elaboração de um estudo mais otimizado, indicando os pilares econômicos mais sustentáveis e demonstrando que é necessária uma visão de todo o ecossistema do negócio, havendo a necessidade de não se trabalhar isolado, mas incluir no modelo todos os atores ou *stakeholders* envolvidos no processo, pois há a necessidade de capturar as variáveis de toda a rede, não só da unidade de negócios da empresa.

## CONCLUSÃO

A execução de um LCC permite identificar os potenciais fatores de custo e economia de custos de um produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, conforme discutido. Ao comparar diferentes alternativas, a opção mais rentável é identificada. Uma variedade de métodos e abordagens tem sido desenvolvida sob a óptica da LCC, devido aos cenários de heterogeneidade e aplicação dos negócios em análise. Neste contexto, combinar o LCC com as externalidades permite ampliar a discussão de custos e benefícios para criação de valor.

No entanto, a utilização do LCC para o cálculo do custo apresenta alguns desafios. Primeiramente, os fatores de custo para fluxos elementares através da cadeia de suprimento do produto são voláteis, portanto isso desafia a aplicação do LCC. Há diferentes atores envolvidos nos modelos de negócios circulares de produtos com diferente estrutura de gerenciamento organizacional, portanto o procedimento para o custeio do ciclo de vida ambiental enfrenta o desafio técnico de alocar a fração exata dos fatores de custo entre múltiplos atores nas fases de produção, transporte e ciclo de vida do produto.

Futuras pesquisas poderão endereçar se há retorno do investimento na criação de operações de resíduos, através do investimento em ativos para implementação de negócios circulares, considerando fatores não oriundos da PNRS, como a renovação do parque instalado dos produtos eletrônicos. Conforme os dados primários levantados durante a pesquisa de campo, outra lacuna para futura pesquisa seria determinar qual seria o valor máximo a ser implementado de conteúdo reciclado em peças plásticas de produtos eletrônicos, com a finalidade de se equilibrar os requisitos de qualidades do produto, desempenho de processo (eficiência e produtividade) e menores custos de produção dentro do contexto de EC.

Além dos atores envolvidos nas contextualizações apresentadas, um estudo futuro identificado durante a discussão dos resultados é (i) o cruzamento com o nível de receita da operação, com a finalidade de se testar as contextualizações apresentadas com alguns cenários subjetivos apresentados durante a discussão dos resultados para cada contextualização. Outras lacunas identificadas para futuros estudos são (ii) testar o modelo numérico com outras matérias-primas com a finalidade de se replicar do modelo e (iii) analisar como integrar o modelo numérico com as variáveis complementares do LCSA (Apêndice A), LCA e SLCA, integrando todas as componentes na análise do modelo teórico do LCSA.

## REFERÊNCIAS

ABAL. Fundamentos do Alumínio e suas Aplicações. São Paulo, **Associação Brasileira do Alumínio (ABAL)**, 2015.

ABRALATAS. **Associação Brasileira dos Fabricantes de Latas de Alumínio**. Disponível em <<http://www.abralatas.org.br/>>. Acesso em: 15 de setembro de 2018.

ALMEIDA, C. M. V. B., RODRIGUES, A. J. M., AGOSTINHO, F., GIANNETTI, B. F. (2017). Material selection for environmental responsibility: the case of soft drinks packaging in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 142, 173-179. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.130>> Acesso em: 10 dez. 2016

ANDERSEN, M. S. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. **Sustainability Science**, v. 2, n. 1, p. 133–140, 2007. Disponível em <DOI 10.1007/s11625-006-0013-6>. Acesso em: 20 set. 2018

SENNA, A. Especial Ayrton Senna Para Sempre do Programa **Sportv Repórter**. São Paulo, 1989.

Associação Europeia do Alumínio. Environment Profile Report. February 2018. **European Aluminum Association**. Disponível em <<https://www.european-aluminium.eu/>>. Acesso em: 15 de setembro de 2018.

AUER, J., BEY, N., SCHAFER, J. M. (2017). Combined Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in the Eco-Care-Matrix: A case study on the performance of a modernized manufacturing system for glass containers. **Journal of Cleaner Production**, 141, 99-109. Disponível em: <doi:10.1016/j.jclepro.2016.08.096>. Acesso em: 10 fev. 2017

AUTODATA. **Autodata Editora Ltda**. Disponível em: <<http://www.autodata.com.br/>>. Acesso em: 21 jul. 2018.

AYDIN, R., KWONG, C.K. and Ji, P., 2015. Coordination of a manufacturer and supply chain partners for product line design with consideration of remanufactured products. **Procedia CIRP**, 29, pp.221-226. Disponível em <doi: 10.1016/j.procir.2015.01.040>. Acesso em: 10 dez. 2016.

BACEN. Câmbio e Capitais internacionais – Taxa de Câmbio. **BACEN (2016)**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/n/TXCAMBIO>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2016.

BARBIERI J. C.; CAJAZEIRA, J. E. R; BRANCHINI O., 2009. Cadeia de suprimento e

avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. **Artigo técnico - O PAPEL** vol. 70, num. 09, pp. 52 - 72 SEP 2009. Disponível em: <<https://bit.ly/2xNXxAt>>. Acesso em: 20 fev. 2018

BRADLEY, Ryan et al. A total life cycle cost model (TLCCM) for the circular economy and its application to post-recovery resource allocation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 141-149, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.017>>. Acesso em: 10 fev. 2018

BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental Empresarial**. 4ª edição, Editora Saraiva. São Paulo, 2016

BIERNACKI, M e ZESZYTY. Environmental Life Cycle Costing (ELCC) in the aspect of cost management in the company. **NAUKOWE UNIWERSYTETU SZCZECIŃSKIEGO** nr 873 Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia nr 77 (2015). Disponível em: <DOI: 10.18276/frfu.2015.77-31>. Acesso em: 10 fev. 2018

BNDES. PANORAMAS SETORIAIS - Mudanças climáticas. **BNDES WEB, 2018**. Disponível em <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7207/1/Cimento\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7207/1/Cimento_P.pdf)>. Acesso em: 24 de setembro de 2018.

BOULDING, K. E., 1966. The economics of the Coming Spaceship Earth. In: H. Jarrett, ed. Environmental quality in a growing economy, resources for the future. **Baltimore: Johns Hopkins University Press**, pp. 3 - 14. Disponível em: <[http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding\\_SpaceshipEarth.pdf](http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceshipEarth.pdf)> > Acesso em: 10 de dez. 2016.

BOURLAKIS, M.; MAGLARAS, G.; AKTAS, E.; GALLEAR, D.; FOTOPOULOUS, C. 2014. Firm size and sustainable performance in food supply chain: Insights from Greek SMEs, **International Journal of Production Economics** 152: 112-130. Disponível em: <<https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/13336/1/Fulltext.pdf>> . Acesso em 10 de dez. 2016

BORCHAT, M.; SELLITO, M.; PEREIRA, G.; POLTOSI L. Implementação do ecodesign: um estudo de caso na indústria eletrônica. **ENEGEP 2007** – Simpósio. Disponível em<[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30800671/ENEGEP2007\\_TR670485\\_9203.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30800671/ENEGEP2007_TR670485_9203.pdf)>. Acesso em: 10 de jan. 2018.

BRADLEY, R.; JAWAHIR, I.S.; BARDURBEEN, F.; ROUCH, K. 2016. A framework for material selection in multi-generational components: sustainable value creation for a circular economy. 23<sup>rd</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP** 48, pg 370 – 375. Disponível em: <doi:10.1016/j.procir.2016.03.247>. Acesso em: 20 jan. 2018.

CARLING, K., HAKANSSON, J., MENG, X., RUDHOLM, N. (2017). The effect on CO2 emissions of taxing truck distance in retail transports. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 97, 47-54. Disponível em : <<https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.010>> . Acesso 16 de set.2018.

CRU. Price Metal Research. **CRU Group**. Disponível em <<https://www.crugroup.com/>>. Acesso: 10 de dezembro de 2016.

DEPEC. Pesquisa de Eletrodomésticos e Eletroeletrônicos. Junho de 2017. **Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Banco Bradesco**. Disponível em <<https://www.economiaemdia.com.br.>> Acesso em: 10 de setembro de 2018.

DERVOJEDA, K., VERZIIL, D., ROUWMAAT, E., PROBST, L., FRIDERES, L., (2014), Clean Technologies - Circular supply chains. **Business Innovation Observatory Report**, European Commission.

DONG, L., ZHANG, H., FUJITA, T., OHNISHI, S., LI, H., FUJI, M., DONG, H. 2013. Environmental and economic gains of industrial symbiosis for Chinese iron/steel industry: Kawasaki's experience and practice in Liuzhou and Jinan. **Journal of Cleaner Production**, 59, 226-238. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.048>>. Acesso em: 10 dez. 2017

ECYCLE. Gestão de Resíduos. Disponível em <https://www.ecycle.com.br/>. Acesso em: 21 de julho de 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity. **Ellen MacArthur Foundation**, p. 12, 2015

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. 2016. **Circular economy**. Disponível em: <<http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy>>. Acesso em 01/11/2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition**. Disponível em: <<http://mvonederland.nl/system/files/media/towards-the-circular-economy.pdf>> . Acesso em 16/11/ 2016.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of Management**, v.14, n.4, p.532-550, oct. 1989.

FARR, J.V.; FABER, I.J.; GANGULY, A.; MARTIN, W.A.; LARSON, S.L.; 2016. Simulation-Based Costing for Early Phase Life Cycle Cost Analysis: Example Application to

an Environmental Remediation Project. **The Engineering Economist**, vol. 61, i. 3. Disponível em < <https://doi.org/10.1080/0013791X.2015.1062582>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

FENG, Z., YAN, N., 2007. Putting a circular economy into practice in China. **Sustainable Science** 2, 95-101. Disponível em <doi: 10.1007/s11625-006-0018-1>. Acesso 10. Dez. 2017.

FIGGE, F., YOUNG, W., BARKEMEYER, R., 2014. Sufficiency or efficiency to achieve lower consumption and emissions? The role of rebound effect. **Journal of Cleaner Production** 69, 216-224. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.031>>. Acesso em 10 jan. 2018

FERRER, G, SWAMINATHAN, J. M. Managing new and differentiated remanufactured products. **Eur. J. Oper.** 2010; 203:370-379. Disponível em: <[doi/10.1016/j.ejor.2009.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.007)>. Acesso em: 20 jan. 2018

FLORINDO, T. J., DE MEDEIROS FLORINDO, G. I. B., TALAMINI, E., DA COSTA, J. S., RUVIARO, C. F. (2017). Carbon Footprint and Life Cycle Costing of Beef Cattle in the Brazilian Midwest. **Journal of Cleaner Production**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.021>> . Acesso em: 20. jan 2018.

GAO C, HOU, H, ZHANG J, ZHANG H; GONG, W. 2006. Education for regional sustainable development: experiences from the education framework of HHCEPZ project. **Journal of Cleaner Production**; 14: 994–1002. Disponível em: <[doi:10.1016/j.jclepro.2005.11.043](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.043)>. Acesso em 10 dez. 2017

GARTNER. GARTNER GROUP. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/industries/manufacturing>>. Acesso em: 21 de julho de 2018.

GENG, Y, FUJITA, T., PARK, H-S., CHIU, A., HUISINGH, D., 2014. Call for papers: Towards post fossil carbon societies: regenerative and preventative eco-industrial development. **Journal of Cleaner Production**. 68, 4-6. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.089>>. Acesso em: 29 jan 2018.

GENOVESE, A., ACQUAY, A.A., FIGUEROA, A. KOH, S.L., 2017. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. **Omega**, 66, pp.344-357. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015>. Acesso em: 10 fev. 2017.

GERMANI, M., MANDOLINI, M., MARCONI, M., MARILUNGO, E. PAPETTI, A., 2015. A system to increase the sustainability and traceability of supply chains. **Procedia CIRP**, 29, pp.227-232. Disponível em; <[doi:10.1016/j.procir.2015.02.199](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.199)>. Acesso em: 20 jan. 2017

GHISELLINI, P., CIALANI, C., ULGIATI, S. 2016. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, 114, 11-32. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

GREGSON, N., CRANG, M., FULLER, S. HOLMES, H., 2014. Interrogating the circular economy: The moral economy of resource recovery in the EU, **Economy and society**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/03085147.2015.1013353>>. Acesso em 20 jan. 2018.

HAAS, W., KRAUSMANN, F., WIEDENHOFER, D., HEINZ, M. (2015). How circular is the global economy: an assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. **Journal of Industrial Ecology**, 19(5), 765-777. Disponível em: < DOI: 10.1111/jiec.12244>. Acesso em 20 jan. 2018

HAPUWATTE, B.; SEEVERS, K.D.; BADURDEEN, F.; JAWAHIR, I.S., 2016. Total life cycle sustainability analysis of additively manufactured products. 23<sup>rd</sup> CIRP Conference on Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP**. 48, 376-381. Disponível em: <[doi:10.1016/j.procir.2016.03.016](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.016)>. Acesso em: 20. dez. 2017.

HUNKELER, D., 2008. Environmental life cycle costing. **Crc Press**.

HALL M., (2015). A transdisciplinary review of the role of economics in life cycle sustainability assessment. **Int J Life Cycle Assess** 20:1625–1639. Disponível em : <[doi:10.1007/s11367-015-0970-z](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0970-z)>. Acesso em: 20 abril 2018

HUANG, K; GUO, J.; ZHENMING, X. Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University. **People's Republic of China Journal of Hazardous Materials**. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.051>. Acesso em: 20 jan. 2018

IDC. Internacional Data Corporation. Disponível em <http://br.idclatin.com/about/>. Acesso em: Julho de 2018.

IDÉIA CIRCULAR. CERTIFICADORA C2C. 2017. Disponível em: <<http://www.ideiacircular.com/artigos>>. Acesso em: 22 novembro de 2017

INNOVA. Disponível em <<http://www.innova.com.br/>>. Acesso em: 21 de julho de 2018.

IRALDO, F., FACHERIS, C., NUCCI, B. (2017). Is product durability better for environment and for economic efficiency? A comparative assessment applying LCA and LCC to two energy-intensive products. **Journal of Cleaner Production**, 140, 1353-1364. Disponível em: <doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.017>. Acesso em . 20 dez. 2017.

JAWAHIR, I.S.; JR DILLON, O.R.; ROUCH, K.E.; JOSHI, K.J.; VENKATACHALM, A. JAAFAR, I.H. Total life-cycle considerations in product design for sustainability: A framework for comprehensive evaluation. **Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Research/Expert Conf.**, Barcelona, Spain, 2006. Disponível em : <doi=10.1.1.402.3563>. Acesso em: 20. Dez 2017.

KNEESE, A. V., AYRES, R. V. D'ARGE, R. C., 1970. Economics and the Environment: a materials balance approach. **Baltimore: John Hopkins University Press**. Disponível em: < doi: 10.2307/1237854> . Acesso em 20. Jan. 2018

KOPLIN, J., SEURING, S., MESTERHARM, M., 2007. Incorporating sustainability into supply management in the automotive industry and the case of the Volkswagen AG. **J. Clean. Prod.** 15 (11), 1053-1062. Disponível em: < doi:10.1016/j.jclepro.2006.05.024> Acesso em 20 jan. 2018.

LACY, P. RUTQVIST, J. **Waste to wealth: the circular economy advantage**. Palgrave Macmillan., New York: 2015.

LEWANDOWSKI, M. Designing the Business Models for Circular Economy — Towards the Conceptual Framework. **Sustainability –MDPI**, 2016. Disponível em :< https://doi.org/10.3390/su8010043>. Acesso em 12 mar. 2018

LI, J., YU, L. (2016). Double externalities, market structure and performance: an empirical study of Chinese unrenewable resource industries. **Journal of Cleaner Production**, 126, 299-307. Disponível: < https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.048>. Acesso em 20. Jan. 2018.

LIMA, DIANA VAZ; DE VIEGAS, WALDYR. Tratamento contábil e evidenciação das externalidades ecológicas. **Rev. Contab. Finanças**. São Paulo, 2002, vol.13, n.30

LINDER, M.; WILLIANDER, M. (2015) Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties. **Business Strategy Environment**. Disponível em: < DOI: 10.1002/bse.1906>. Acesso em: 20 jan. 2018.

LOVINS, A. AND BRAUNGART, M. (2014), A New Dynamic - Effective Business in a Circular Economy, 2º Edição, **Ellen MacArthur Foundation Publishing**, Cowes, Isle of Wight.

LOW, J. S. C.; LEE, H. M.; SONG, B. Product Structure-based Integrated Life cycle Analysis (PSILA) technique for cost modelling and analysis of closed-loop production systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 105–117, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.037>>. Acesso em: 20 fev. 2018

MARTINEZ-SANCHEZ, V., LEVIS, J. W., DAMGAARD, A., DECAROLIS, J. F., BARLAZ, M. A., ASTRUP, T. F. (2017). Evaluation of External Costs in Life-Cycle Optimization of Municipal Solid Waste Management Systems. **Environmental Science & Technology**, 51(6), 3119-3127. Disponível em: < DOI: 10.1021/acs.est.6b06125>. Acesso em: 20 jan. 2018.

MATHEWS, J.A., 2011. Naturalizing capitalism: The next Great Transformation. **Futures**, Vol. 43 – 8, 868–879. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.06.011>>. Acesso em 20 jan. 2018

MENA, C., ADENSO-DIAZ, B., YURT, O., (2011), “The Causes of Food Waste in the Supplier - Retailer Interface: Evidences from the UK and Spain”, **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 55, 648-658. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.006>>. Acesso: 20 jan. 2018.

MENTINK, B. 2014. Circular Business Model Innovation: A Process Framework and a Tool for Business Model Innovation in a Circular Economy. Master’s Thesis, **Delft University of Technology & Leiden University, Leiden**. The Netherlands. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1765/24444>>. Acesso 20 de jan. 2018

MDCI. **Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços**. Base de Dados. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/9/arquivos-atuais>>. Acesso em: 21 de dezembro 2018.

NASIR, M. H. A., GENOVESE, A., ACQUAYE, A. A., KOH, S. C. L., & YAMOA, F. (2017). Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, 183, 443-457. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008>>. Acesso em: 20 jan. 2018

METAL BULLETIN. Prices Analysis- Premium Intelligence Service. **METAL BULLETIN** Disponível em: < <https://www.metalbulletin.com/>>. Acesso: 10 de dezembro de 2016.

NAUSTDALSLID, J., 2014. Circular economy in China – the environmental dimension of the harmonious society. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/13504509.2014.914599>>. Acesso em: 20 jan. 2018

NBR ISO 14040 e 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. **ABNT, 2009**.

NESS, D., 2008. Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure system. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, 15, 288-301. Disponível em: < DOI 10.3843/SusDev.15.4:2>. Acesso em: 20 jan. 2018

**NEXANS CABOS, 2017**. Disponível em <[https://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt\\_BR/navigate\\_-42/Global\\_expert\\_in\\_cables\\_and\\_cabling\\_systems.html](https://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/navigate_-42/Global_expert_in_cables_and_cabling_systems.html)>. Acesso em: 25 nov.2017

NGUYEN, T.L.T. ; GHEEWALA, S.H., S. BONNET Life cycle cost analysis of fuel ethanol produced from cassava in Thailand Int. **J. Life Cycle Assess.**, 13 (2008), pp. 564–573. Disponível em: <DOI 10.1007/s11367-008-0035-7>. Acesso em: 20 jan. 2018

NIERO, M., OLSEN, S. I. (2016). Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. **Resources, Conservation and Recycling**, 114, 18-31. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.023>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

NIERO, M.; HAUSCHILD, M. Z. Closing the Loop for Packaging: Finding a Framework to Operationalize Circular Economy Strategies. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 685–690, 2017. Disponível em: < doi: 10.1016/j.procir.2016.11.209>. Acesso em: 20 jan. 2018

OLIVEIRA, U. R. DE; SILVA MARINS, F. A.; JÚNIOR, J. M. Logística reversa e identificação de produtos: revisão teórica para indústria eletroeletrônica. **Revista Produção Online**, v. 16, n. 2, p. 633, 2016.

PALMER, F. D. Environmental externalities and CO2: not with our money, you don't. **The Electricity Journal**, v. 4, n. 2, p. 40–45, 1991. Disponível em: <doi:10.1016/1040-6190(91)90170-x>. Acesso em: 20 jan. 2018

PEARCE, D. & TURNER, R. K., 1990. Economics of Natural Resources and the Environment. **London: Harvester Wheatsheaf**. Disponível em < doi:10.2307/3146419>. Acesso 20 jan. 2018.

PETROBRÁS. Composição de Preços de Venda ao Consumidor. **BR Distribuidora Petrobrás**. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/>>. Acesso: 10 de dezembro 2016.

SANTOS, M. T.2010. **Mudanças climáticas** : mais barato agir do que ignorar. UNB, 2010. Disponível em; < [periodicos.unb.br/index.php/sust/article/download/734/450](http://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/download/734/450)>. Acesso em 16

set. 2018.

SCHEEPENS, A.E., VOGTLÄNDER, J.G. AND BREZET, J.C., 2016. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyze and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. **Journal of Cleaner Production**, 114, 257-268. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>>. Acesso em: 20 jan. 2018

SEN, B., ERCAN, T., & TATARI, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference?—Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. **Journal of Cleaner Production**, 141, 110-121. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

SILALERTRUKSA, T., BONNET, S., & GHEEWALA, S. H. (2012). Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, 28, 225-232. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.022>>. Acesso em: 20 set. 2018.

SIMÕES, C. L.; COSTA PINTO, L. M.; SIMOES, R.; BERNARDO, C. A. Integrating environmental and economic life cycle analysis in product development: a material selection case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 9, p. 1734–1746, 2013. Disponível em: < DOI 10.1007/s11367-013-0561-9>. Acesso em: 20 jan. 2018.

SINGH, J., ORDOÑEZ, I. (2016). Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. **Journal of Cleaner Production**, 134, 342-353. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.020>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

STAHEL, W., 2010. The Performance Economy, **Palgrave-MacMillan**, London. 2ªed., 350.

STIGLITZ, J. (2000), Economics of the Public Sector, **W.W. Norton**, New York, NY.

SU, B., HESHMATI, A., GENG, Y., YU, X., 2013. A review of the circular economy in China: moving from theory to implementation. **Journal of Cleaner Production**, 42, 215-277. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

SUN, Qiang. Research on the influencing factors of reverse logistics carbon footprint under sustainable development. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 29, p. 22790-22798, 2017. Disponível em: < DOI 10.1007/s11356-016-8140-9>. Acesso em: 20 jan. 2018

SWARR T., KLÖPFFER W., HUNKELER D., PESONEN H. , CIROTH A. , BRENT A. , PAGAN R. (2011) .Environmental life-cycle costing: a code of practice. **Int J Life Cycle**

Assess 16:389–391. Disponível em: < DOI 10.1007/s11367-011-0287-5>. Acesso em: 20 jan. 2018.

TUPPER, J., WHITEHEAD, P., (2011), Reducing Food Waste through Retail Supply Chain Collaboration. **WRAP - Waste & Resources Action Programme**, Oxon. Disponível em: < DOI 10.1007/s11367-011-0287-5>. Acesso em: 20 jan. 2018.

VORASAYAN J, RYAN SM. Optimal price and quantity of refurbished products. **Prod Oper Manag.** . 2006; 15(3):369-383. Disponível em; < DOI/10.1111/j.1937-5956.2006.tb00251.x>. Acesso em: 20 jan. 2018.

WALKER, H.; SEURING, S.; SARKIS, J. & KLASSEN, R. 2014. Sustainable operations management: recent trends and future directions, **International Journal of Operations & Production Management.** 34(5): 1–6. Disponível em: < DOI/10.1108/IJOPM-12-2013-0557>. Acesso em: 20 jan. 2018.

WEBSTER, K. (2015), The Circular Economy - a Wealth of Flows, **Ellen MacArthur Foundation Publishing**, Cowes, Isle of Wight.

WELDU, Y. W., & ASSEFA, G. (2017). The search for most cost-effective way of achieving environmental sustainability status in electricity generation: Environmental life cycle cost analysis of energy scenarios. **Journal of Cleaner Production**, 142, 2296-2304. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.047>. Acesso em: 20 jan. 2018

WRINKLER, H., 2011. Closed-loop production systems e a sustainable supply chain approach. **CIRP J. Manuf. Sci. Technol.** 4, 243 e 246. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.05.001>. Acesso em: 20 jan. 2018.

YUAN, ZW. The Circular Ecology: A New Development Strategy in China. **Journal of Industrial Ecology** 2006; 10:4–8. Disponível em: < DOI: 10.1162/108819806775545321> Acesso em: 20 jan. 2018.

YIN, R.K. **Estudo de Caso: Planejamento e métodos.** 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

YI, P.-T., LI, X. ZHOU, Y., LI, W.-W. (2017). Selection Model of Eco-city Evaluation Indexes and Its Application. Dongbei Daxue Xuebao/**Journal of Northeastern University.**38, 8, 1211-1216.

YACAN WANG A,N , BENJAMIN T. HAZEN. Consumer product knowledge and intention to purchase remanufactured products. **Department of Economics, Beijing Jiaotong**

ZHU, Q., GENG, Y. AND LAI, K.H., 2010. Circular economy practices among Chinese manufacturers varying in environmental-oriented supply chain cooperation and the performance implications. **Journal of Environmental Management**, 91(6), 1324-1331.

ZINK, T., & GEYER, R. (2017). Circular Economy Rebound. **Journal of Industrial Ecology**. Disponível em: < doi:10.1016/j.jenvman.2010.02.013>. Acesso em: 20 jan. 2018

UGAYA, C.M.L. **Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos**. Cap. 9. Gestão ambiental de unidades produtivas. **Elsevier**. 2012.

UNEP, SETAC. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. Paris: **UNEP**, 2009 p. 103.

UNEP, SETAC. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. **UNEP**, 2011.

VAN BERKEL, R., 2007. Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996-2004. **Journal of Cleaner Production**. 15, 741 e 755. Disponível em: < doi:10.1016/j.jclepro.2006.06.012>. Acesso em: 20 jan. 2018

VAN BERKEL, R., FUJITA, T., HASHIMOTO, S., GENG, Y., 2009. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the Eco-Town program 1997e2006. **J. Environ. Manag.** 90, 1544 e 1556. Disponível em: < doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.010>. Acesso em: 20 jan. 2018.

VEZZOLI, C., CESCHIN, F., DIEHL, J., KOHTALA, C. (2015) New Design Challenges to Widely Implement “Sustainable Product-Service Systems”. **Journal of Cleaner Production**, 97, 1-12. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.061>. Acesso em: 16 set. 2017.

VOLKSWAGEN. **Tabela de Preço de Caminhões**. Disponível em <https://www.vw.com.br/pt.html.>. Acesso em: 10 de dezembro de 2016.

XAVIER, C. **Pensamento e Vida: Espírito Emmanuel**. **Ed. Saraiva**. São Paulo, 2018

**ANEXO A – DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DA  
EMBALAGEM METÁLICA (AÇO & ALUMÍNIO) PARA  
ALIMENTOS**

### **Can Body Production Process (Processo Produtivo do Corpo da lata):**

- **Coating & Litography (Pintura & Litografia):** Processo no qual é inserido um verniz de proteção ou verniz de barreira entre o metal e o alimento na parte interna do corpo da lata. Na parte externa é aplicado um verniz de proteção contra a corrosão para ambientes externos. Os rótulos de informação do produto como marca e informações alimentícias podem ser pintados (Litografia) na parte externa da lata durante essa etapa, caso o fabricante de alimentos escolha essa opção ao invés de utilizar o processo de rotulagem. Nessa etapa há geração de sucata de alumínio.
- **Draw & Redraw (Prensa de Desenho e Redesenho):** Com altas velocidades de produção, esse sistema projeta e cria latas 2 peças, bem como quaisquer outros tipos de recipientes desenhados, como latas de comida e aerossol. Esse sistema pode possuir de duas a três prensas a partir de materiais de medidas reduzidas como metais laminados. Nesse sistema há a produção de recipientes de paredes rasas ou profundas desenhadas, em linhas retas, formas cônicas ou com laterais reduzidas. As alterações de tamanho variam de acordo com os conjuntos de moldes de desenho e redesenho. Nesse sistema há geração de sucata de metal.
- **Trimmer Process (Processo de Corte de “Beiradas”):** Processo produtivo que pode atuar integrado ao sistema da prensa Draw & Redraw, o qual é responsável em definir os tamanhos (Altura) da lata. Esse sistema possui facas e outros aparadores em dispositivos estacionários e cabeças de corte móveis que movimentam as facas para a realização dos cortes nas latas. Nesse sistema há geração de sucata de metal.
- **Filling Process (Processo de Envase):** Nessa etapa do processo produtivo, o alimento é inserido na lata e recoberto com a tampa “easy open” (Tampa com anel de fácil abertura).
- **Conversion Press (Prensa de Recravamento ou Conversão):** Processo de “Recravamento” ou selagem da tampa com o corpo de metal.
- **Label (Rotulagem):** Os rótulos de informação do produto como marca e informações alimentícias são inseridos através de um rótulo e colado na parte da externa da lata.

### **Can End Production Process (Processo Produtivo da Tampa da lata):**

- **Coating & Litography (Pintura & Litografia):** Processo no qual é inserido um verniz de proteção ou verniz de barreira entre o metal e o alimento na parte interna do corpo da lata. Na parte externa é aplicado um verniz de proteção contra a corrosão para ambientes externos. Os rótulos de informação do produto como marca e informações alimentícias podem ser pintados (Litografia) na parte externa da tampa durante essa etapa, caso o fabricante de alimentos escolha essa opção. Nessa etapa há geração de sucata de alumínio.
- **End Press (Prensa da Tampa):** Basicamente é uma prensa de estampagem da tampa e esse estágio se difere do processo Draw & Redraw realizado durante a fabricação do corpo, pois não há estiramento do metal e nem redesenho da lata em formas específicas. Nessa etapa do processo de produção há geração de sucata de alumínio.
- **Tab Press (Prensa do Anel):** O processo produtivo na prensa de estampagem possui o mesmo objetivo da prensa da tampa; conformação da forma, ou seja, o anel. Nessa etapa do processo, há geração de sucata de alumínio. Geralmente o anel de metal é adquirido pelo fabricante alimentício já envernizado pelo fornecedor, ou seja, não é necessário submeter o metal a um processo de pintura.
- **Conversion Press (Prensa de Conversão):** Essa etapa do processo é onde há a inserção do anel metálico na Tampa para a formação da tampa formato “easy open”. Essa inserção é realizada através da formação de uma bolha por uma ferramenta (punção), a qual “recrava” o anel na tampa.
- **Semi Shear Process (Processo de Semi-Corte):** Esse processo onde há a formação de um semi-corte de diâmetro menor do que a tampa, devido a região de recravamento da tampa com a lata. A finalidade de realização desse corte é o desenvolvimento do sistema “easy open”, o qual permite o usuário abrir a lata através do anel, sem a necessidade de um terceiro dispositivo, como um abridor.

**ANEXO B – QUESTIONÁRIO (ROTEIRO DE VISITA).**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – LINHA DE**  
**PESQUISA – GESTÃO DE OPERAÇÕES E INOVAÇÃO**

**Roteiro de Pesquisa**

Prezado (a):

Estamos realizando uma pesquisa sobre Economia Circular (EC), e gostaríamos de contar com sua valiosa colaboração, pois estamos conduzindo um subprojeto que se refere especificamente a levantar e analisar os “frameworks” disponíveis para a implementação das estratégias da EC, analisando o LCC (life cycle costing) e a parte ambiental. Assim, gostaríamos inicialmente de trocar experiências em função do seu envolvimento em projetos desta temática.

Esta investigação está sendo conduzida no âmbito do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – FEI e da Iniciação Científica na graduação em Engenharia de Produção. O estudo refere-se a uma pesquisa acadêmica cujos resultados serão de uso restrito e confidencial para uma dissertação de mestrado e trabalhos científicos que serão divulgados, sendo mantido o anonimato de todos os participantes e o sigilo de informações pessoais.

Agradecemos antecipadamente a colaboração com esta pesquisa e nos colocamos ao inteiro dispor para esclarecimento e eventuais dúvidas.



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Claudia Aparecida de Mattos

e-mail: [cmattos@fei.edu.br](mailto:cmattos@fei.edu.br) ou [claudia.mattos@usp.br](mailto:claudia.mattos@usp.br)

tel. 11 4353-2900 r. 2213

cel. 11 991591857

Thiago Lourenço Meira De Albuquerque

Mestrando em Engenharia Mecânica – linha de Pesquisa Gestão de Operações e Inovação – tema de pesquisa – Economia Circular

Tel. (11) 9 9519-1964

e-mail: [thiago1678@terra.com.br](mailto:thiago1678@terra.com.br)

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – LINHA DE**  
**PESQUISA – GESTÃO DE OPERAÇÕES E INOVAÇÃO**

**1-Informações da Empresa**

1.1- Nome da Empresa: \_\_\_\_\_

1.A- Número total de funcionários:

( ) até 100

( ) 100-499

( ) >500

1.B- Faturamento anual:

( ) até 10 milhões reais

( ) 10-100 milhões reais

( ) 100 milhões - 1 bilhão reais

( ) 1bilhão - 10 bilhões reais

( ) >=10 bilhões reais

1.4-Setor industrial a que pertence:

1.5- Origem capital:

( ) nacional

( ) estrangeiro

**Caracterização do Respondente:**

Nome:

Cargo:

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – LINHA DE  
PESQUISA – GESTÃO DE OPERAÇÕES E INOVAÇÃO

- 1- Vocês poderiam, por favor, nos descrever e confirmar quais são os tipos de produtos que são recebidos e processados na operação da Empresa?
- 2- Dentro do contexto da Economia circular; (Produtos que retornam para um processo de reciclagem com o propósito de reinserir a matéria-prima reciclada no processo de produção) quais desses produtos são reprocessados e quais matérias-primas retornam ao processo de seus clientes?
- 3- Referente aos produtos (Matérias Primas) que não retornam ao processo do cliente, quais são realizadas somente a gestão de resíduos? Entre essas matérias-primas; quais a empresa consegue reciclá-las e vender esses materiais reciclados a outras empresas? Quem é o proprietário dessa sucata após a gestão de resíduos (Cliente ou Empresa)?
- 4- Referente às matérias-primas recicladas; elas são vendidas ou reprocessadas pelos fornecedores com a finalidade de se reintroduzir no processo de novos produtos em ciclo fechado? Caso positivo, qual seria de conteúdo reciclado nos produtos (%)?
- 5- Referente aos componentes eletrônicos, cabos, peças metálicas e partes plásticas; eles são revendidos a algum terceiro?
- 6- Pela gama de clientes da empresa; caso exista clientes que somente os contratam para gestão do resíduo; quantos itens da PNRS a empresa consegue atender para a prestação de serviço ao cliente? O foco de clientes da empresa é todo Brasil?
- 7- Com relação a logística reversa, como funciona a operação e qual sua capilaridade a nível Brasil? Os clientes possuem próprio postos de coleta ou toda a gestão é realizada pela empresa?
- 8- Qual volume mensal que é retornado à Empresa? Hoje, qual % média da Capacidade Produtiva que a empresa opera?
- 9- Haveria a possibilidade de se realizar uma visita a fim de se conhecer a operação da empresa?

**APÊNDICE A**  
**MODELOS TEÓRICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO CIRCULAR**

## MODELOS TEÓRICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO CIRCULAR

Comparar diversos modelos teóricos na EC agrega na tomada de decisão do negócio e analisa quais indicadores estão sendo medidos e englobados dentro do pilar de sustentabilidade. A combinação de diferentes modelos teóricos pode ser útil para ajudar as empresas superarem os desafios colocados pela economia circular. Na literatura autores realizam estudos qualitativos dentro do contexto de economia circular e analisam quais modelos teóricos são mais eficientes para englobar a tomada de decisão dentro dos padrões da economia circular na estratégia de sustentabilidade.

Niero e Hauschild (2017) desenvolveram um estudo com objetivo de levantar e analisar os modelos teóricos disponíveis para a implementação das estratégias da economia circular. Os modelos teóricos pesquisados pelos autores citados são Cradle to Cradle (C2C), Indicador de Circularidade do Material (MCI) e LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment), os quais analisam suas limitações e benefícios na introdução da EC para o setor de embalagem de alumínio na Europa. Low et al 2016 estrutura um modelo teórico de LCC, integrando todas as fases do ciclo de vida de um monitor LCD ou FPD com a finalidade de estruturar ferramentas que permitam analisar o LCC de produtos em modelos de negócios de economia circular, tanto para materiais em ciclo fechado e para materiais que serão revendidos ou descartados.

A seleção dos melhores modelos teóricos para se operacionalizar a economia circular em um contexto industrial não é direto. Com a análise de diferentes modelos teóricos para implementação de economia circular, procura-se estimular a discussão sobre o papel das ferramentas de apoio à decisão no contexto da economia circular em prática, construindo em uma experiência prática no setor de embalagens de alumínio, eletrônico e linha branca.

Esse apêndice aborda quatro modelos teóricos; três modelos relacionados às estratégias de implementação de EC. Esses modelos teóricos se dividem em (i) Cradle to Cradle (C2C), (ii) Indicador de Circularidade do Material (MCI) e a componentes complementares do (iii) LCSA; (a) LCA e (b) SLCA, que possuem a finalidade de apoiarem o estudo teórico do trabalho dentro do contexto de EC.

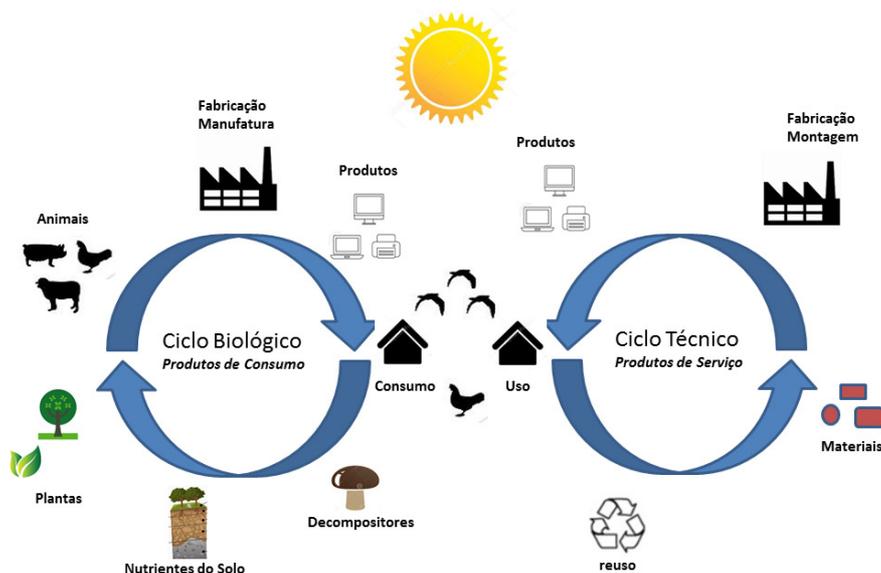
## **Cradle to Cradle (C2C)**

O termo C2C foi criado, registrado e publicado por McDonough e Braungart (2002) em um livro chamado “*Cradle to Cradle: Remain the Way We Make Things*”, um manifesto que fornece detalhes específicos de como alcançar e realizar o design do modelo “Cradle to Cradle”. McDonough e Braungart (2002) argumentam que o design do C2C é orientado para a qualidade dos produtos e sua inovação e tem como objetivo aumentar a pegada positiva dos produtos, criando soluções de "eco-eficiente", ou seja, maximizar o benefício de sistemas ecológicos e econômicos. A visão de C2C é identificada como um dos principais pilares conceituais do conceito da economia circular, maximizando o benefício dos sistemas econômicos (Niero e Hauschild; 2017).

Segundo Niero e Hauschild (2017), a visão C2C baseia-se em três princípios; (1) "O lixo é igual à comida", isto é, tudo é um recurso a ser reaproveitado; (2) "Captar e Utilizar a Energia Solar", ou seja, utilizar energia renovável e (3) "Celebrar a Diversidade", isto é, não existe uma solução que sirva para todos os problemas. Segundo a consultoria Ideia Circular (2017), esses três princípios para o design do C2C permitem desenhar produtos e sistemas efetivos, que se baseiam no conhecimento milenar da natureza e constroem um desenvolvimento benéfico dos sistemas naturais, gerando prosperidade ambiental, social e econômica. A utilização desses três princípios redireciona as estratégias de sustentabilidade de uma forma além da redução ou minimização dos danos e adota em uma política efetiva de otimização de ganhos.

No design do C2C, dois ciclos de materiais podem ser distinguidos em uma estruturação de projeto: (i) o ciclo técnico e o (ii) ciclo biológico. O ciclo técnico é o ciclo que é alimentado com nutrientes técnicos, ou seja, materiais que possuem potencial para permanecer e potencializar o sistema de ciclo fechado durante a reciclagem, recuperação e reutilização, mantendo seu valor mais elevado através de vários ciclos de vida do produto (NIERO; HAUSCHILD, 2017). O ciclo biológico corresponde aos materiais que deverão ser desenhados para um retorno seguro e nutritivo/regenerativo à biosfera (IDEIA CIRCULAR, 2017). Na figura 43, pode-se ilustrar a representação dos ciclos técnicos e biológicos.

Figura 45 - Representações dos ciclos técnicos e biológicos do Cradle to Cradle



Fonte: Autor adaptado de Ideia Circular (2017)

Segundo Niero e Hauschild (2017), para se operacionalizar o design C2C nas empresas, existem certificações homologadas pela C2C Trademark. Durante a certificação, há uma avaliação de cinco critérios: (1) saúde material (MH), (2) reutilização de material (MR), (3) energia renovável e gerenciamento de pegada de carbono (RE & CM), (4) administração de água (WS) e (5) justiça social (SF). Os dois primeiros critérios (MH e MR) avaliam a composição do produto. A MH fornece classificações de avaliação de materiais (a chamada "avaliação ABC-X") com base na periculosidade de materiais químicos nos produtos e suas rotas relativas de exposição durante o seu uso pretendido durante os estágios do ciclo de vida. O MR fornece um valor quantitativo, o qual se mede o design do produto para reciclagem (ciclo técnico) e / ou composição (ciclo biológico). Os três últimos critérios referem-se ao processo de produção e organizacional. O estágio RE & CM fornece uma medida quantitativa da parte das energias renováveis utilizadas para a fabricação do produto. O estágio de WS fornece uma medida quantitativa e qualitativa de uso de água e efluentes relacionados diretamente com a fabricação do produto certificado, enquanto isso o estágio SF se refere a um método qualitativo de medida do impacto da fabricação de produtos em pessoas e comunidades. O foco da filosofia C2C está concentrado, principalmente, no material, através dos critérios MH e MR, enquanto os aspectos RE & CM, WS, SF são implementados e avaliados em uma menor intensidade.

Algumas consultorias de C2C no mercado brasileiro complementa que a certificação C2C segue um programa de melhoria contínua, avaliado a cada dois anos e envolve o produto

e sua fabricação nas cinco avaliações citadas anteriormente, possuindo cinco níveis de certificação (Platino, Ouro, Prata, Bronze e Básico). Empresas como a Alcoa, Ford e Nike possui certificações C2C em algumas linhas de produtos possuem a certificação C2C e ainda Wang et al (2015) exemplifica uma modelagem de implementação do C2C na indústria de aço chinesa.

### **Circularidade do Material**

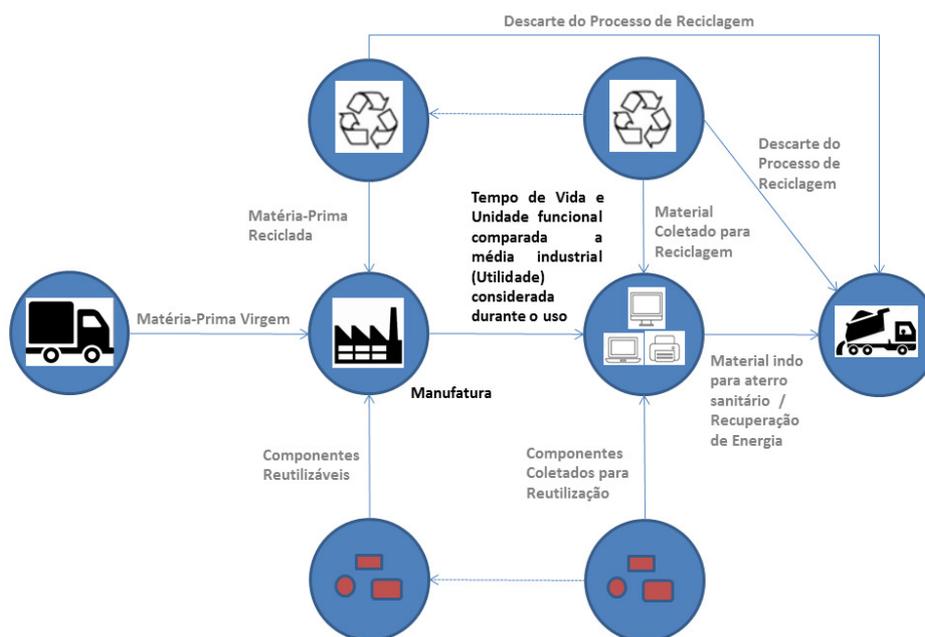
A Fundação Ellen MacArthur desenvolveu um projeto para definir indicadores de Circulação de Materiais (MCI) que medem o desempenho de um produto no contexto de uma economia circular, permitindo que as empresas estimem o quanto avançado se posicionam em sua jornada de transformação de economia linear para a economia circular. Os índices desenvolvidos no projeto consistem em um indicador principal, o MCI, que mede como os fluxos materiais de um produto ou empresa são restauradores, e indicadores complementares, que permitem levar em consideração os impactos e riscos adicionais. O conjunto de indicadores pode ser usado na concepção de novos produtos (com a finalidade de apoiar o uso da circularidade como um critério de design), para fins de controle interno ou para decisões de aquisição, por exemplo, definindo um requisito mínimo para a compra de produtos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Segundo Niero e Hauschild (2017), as entradas utilizadas para calcular o MCI referem-se basicamente a quatro aspectos: (i) material de entrada na produção processo, isto é, o conteúdo reciclado; (ii) utilidade durante o estágio de uso, isto é, quanto tempo e intensamente é o produto usado; (iii) destino após o uso, ou seja, a taxa de reciclagem e (iv) eficiência da reciclagem, isto é, o rendimento do processo de reciclagem. Uma conta detalhada de materiais para o produto torna-se necessária para calcular o MCI, listando todos os dados acima para os seus componentes e materiais.

Referente aos indicadores de circularidade, a Fundação Ellen MacArthur mostra no diagrama da figura 46, os fluxos de material levados em consideração para chegar ao Indicador de Circularidade do Material em um produto. O MCI resulta em um valor entre 0 e 1, onde o maior o valor indica que o produto possui um maior índice de circularidade. Especificamente, as seguintes entradas são usadas para calcular o MCI: (i) entrada no processo de produção; como a entrada é proveniente de materiais virgens, reciclados e componentes reutilizáveis; (ii) sua utilidade durante a fase de uso, ou seja, por quanto tempo e quanto o produto é usado intensamente em comparação a um produto similar da indústria (porque não é somente levado

em consideração o aumento da durabilidade dos produtos, porém sua reparação / manutenção e consumo compartilhado dentro do modelo de negócios); (3) seu destino após o uso, ou seja, quanto de material entra em aterro, quanto material é coletado para reciclagem e quais são os componentes coletados para reutilização; (4) Eficiência da reciclagem: quão eficientes são os processos de reciclagens utilizados para produzir uma entrada de material reciclado e a sua “reciclabilidade” de material pós-uso (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Figura 46 - Diagrama de Circularidade



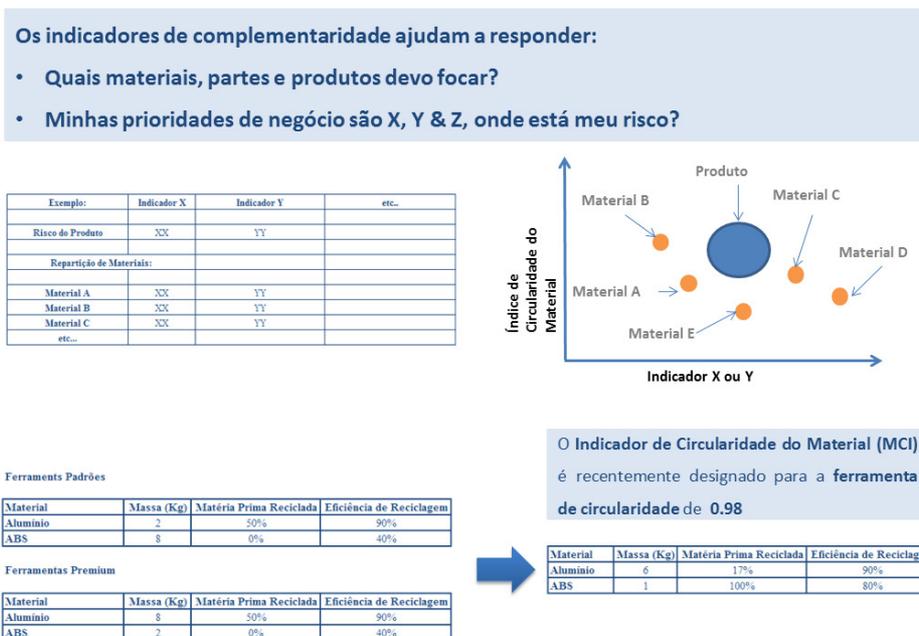
Fonte: Autor adaptado de Ellen Mac Arthur (2015)

Segundo a Fundação Ellen Mac Arthur (2015), a fim de que se calcule o MCI é necessário detalhar uma lista de materiais relacionados ao produto, onde se encontra todos os dados de seus componentes e materiais. Na figura 47, pode-se observar uma lista padrão e um exemplo de produto; dispositivos e ferramentas domésticas (“Widget Store”).

Complementando a análise dos indicadores; Niero e Hauschild (2017) ressaltam a necessidade de adicionar indicadores de riscos complementares, com a finalidade de se fornecer maiores informações sobre os riscos potenciais em relação às prioridades das empresas, por exemplo, variação do preço do material, riscos na cadeia de fornecimento do material como escassez de material e seu nível de toxicidade. Esses indicadores poderão fornecer informações adicionais para avaliar como a mudança no nível de circularidade do material poderá afetar

outros níveis de interesse para as empresas e seus “stakeholders” como uso de energia, emissões de CO2 e água.

Figura 47 - Exemplo da metodologia de cálculo da Circularidade do Material



Fonte: Autor adaptado da Fundação Ellen MacArthur (2015), p. 34

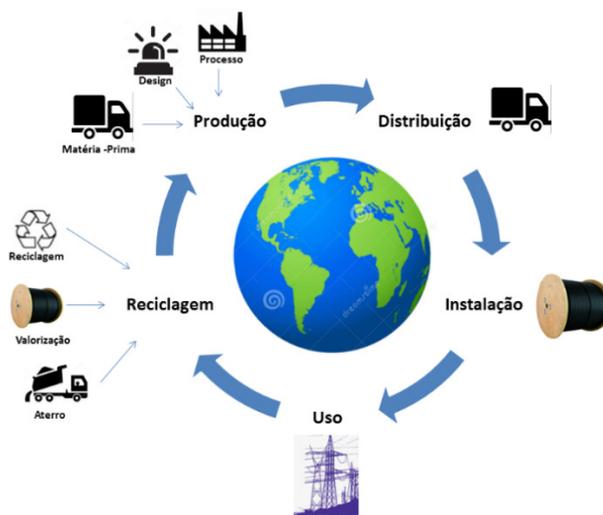
## COMPONENTES COMPLEMENTARES DO LCSA

Após a introdução do conceito do LCSA; existe a necessidade em se aprofundar nos conceitos do complementares do LCSA; (i) LCA e (iii) SLCA, a fim de se obter a complementação da fundamentação teórica para a metodologia do trabalho. A primeira componente do LCSA; (i) o LCA ou análise do custo do ciclo de vida (ACV = LCA), consolida todos os impactos associados ao ciclo de vida de um produto que estejam diretamente cobertos por um ou mais dos atores no ciclo de vida do produto (por exemplo, fornecedor, produtor, usuário ou consumidor) (SWARR et al.;2011). O termo Análise do Ciclo de Vida (ACV), ou em inglês, "Life Cycle Assessment" (LCA) surgiu primeiramente nos Estados Unidos da América (EUA) em 1970 e um dos primeiros estudos quantificando às necessidades de recursos, emissões e resíduos feito pelo “Midwest Research institute” (MRI) para a Coca-Cola, com a finalidade de se demonstrar que as garrafas de plástico não eram piores, do ponto de vista ambiental, do que as de vidro (ROMÃO, 2016). Em companhias sustentáveis, novos produtos

não somente se qualificam em termos de qualidade, desempenho e preço, mas também consideram seus efeitos ambientais em longo prazo.

A Análise do Ciclo de Vida (LCA) quantifica os impactos no meio ambiente do produto ou sistema durante todos os estágios do ciclo de vida e conhecido pelo seu termo em inglês – “Cradle to Grave” (do berço ao túmulo) (NEXANS, 2017). O conceito “Cradle to Grave” se iguala ao conceito de Economia Linear (Produzir, Consumir e Descartar) e para atender as crescentes solicitações das avaliações dos efeitos de produtos e serviços no meio ambiente, algumas empresas no mercado como a Nexans (Fabricantes de Cabos) possuem software específico para análise LCA.

Figura 48 - Análise do Ciclo de Vida - (LCA)



Fonte: Autor adaptado de Nexans (2017)

A principal preocupação da Análise do Ciclo de Vida é identificar qual o impacto negativo que mais prevalece no ciclo de vida do produto, de modo que a transferência de degradação ambiental e poluição sejam evitadas através de soluções alternativas. O LCA tem como objetivo principal analisar o desenvolvimento sustentável a fim de proteger o meio ambiente, contribuindo para melhoria dos padrões de vida atuais e futuros, resultando em inovação do produto.

Como citado anteriormente, o interesse sobre o LCA se iniciou na década de 1970, entretanto, sua importância não se desenvolveu antes da década de 1980 e após anos de avanço, como uma metodologia estruturada reconhecida, o LCA tornou-se disponível em 1997 como uma norma ISO (ISO/EN/DIN 14040, 1997) (BARBIERI et. al., 2009). O método da LCA não se aplica apenas para produtos, porém também se aplica para os processos técnicos (BURGESS,

BRENNAN, 2001; CURRAN, 2000) e com a finalidade de se observar a classificação das normas, Barbieri et. al (2016) elaborou um quadro com os resumos das normas ISO referentes às análises LCA, conforme descrito no quadro 4.

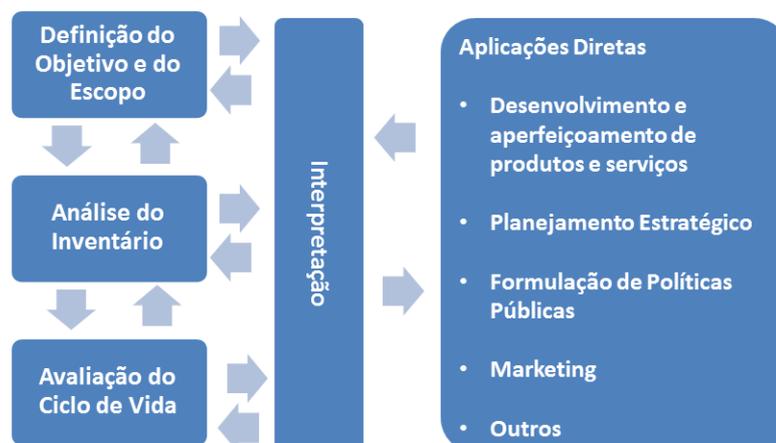
Quadro 4 - Normas ISO sobre o LCA

<b>Norma ISO</b>	<b>Título</b>	<b>Descrição</b>
<b>14040:2006</b>	Avaliação do ciclo de vida – princípios e estruturas	Proporciona os elementos gerais e metodológicos requeridas para uma ACV de produtos e serviços
<b>14044:2006</b>	Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requerimentos e diretrizes	Especifica requisitos e proporciona um guia para a LCA, incluindo exemplos, incorpora os temas tratados nas normas ISO 14041, 14042 e 14043.
<b>14048:2002</b>	Avaliação do ciclo de vida (ACV) – Informações sobre apresentação de dados para um estudo de ACV	Proporciona informação sobre o formato dos dados para suporte de uma ACV
<b>14049:2000</b>	Avaliação do ciclo de vida – Exemplos para aplicação da norma ISO 14041	Ilustra com exemplos como aplicar as normas ISO 14041
<b>14062:2002</b>	Gestão ambiental: Integração dos aspectos ambientais no desenvolvimento de produtos, juntamente com suas exigências e diretrizes.	Descreve conceitos e práticas usadas para integrar aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento de produtos e serviços
<b>14047:2003</b>	Avaliação do ciclo de vida – Exemplos para aplicação da norma ISO 14042	Ilustra com exemplos como aplicar a norma ISO 14042

Fonte: Autor adaptado de Barbieri, 2009.

Complementando a necessidade de padronização, Miah et al (2017) reforça que para se entender melhor como se elabora uma análise LCA, sua estrutura e suas exigências estão dispostas nas normas DIN/ISO 14040 –14044 (ISO 2006). De acordo com estas normas destacadas no ISO, o LCA é dividido em quatro partes; (i) definição dos objetivos e metas, (ii) análise de inventário, (iii) avaliação de impacto e (iv) interpretação para cada fase, conforme mostrado na figura 49 (MIAH et. al, 2017).

Figura 49 - Fases de Análise do LCA - ISO 14040 – ISO 14044 (2006)

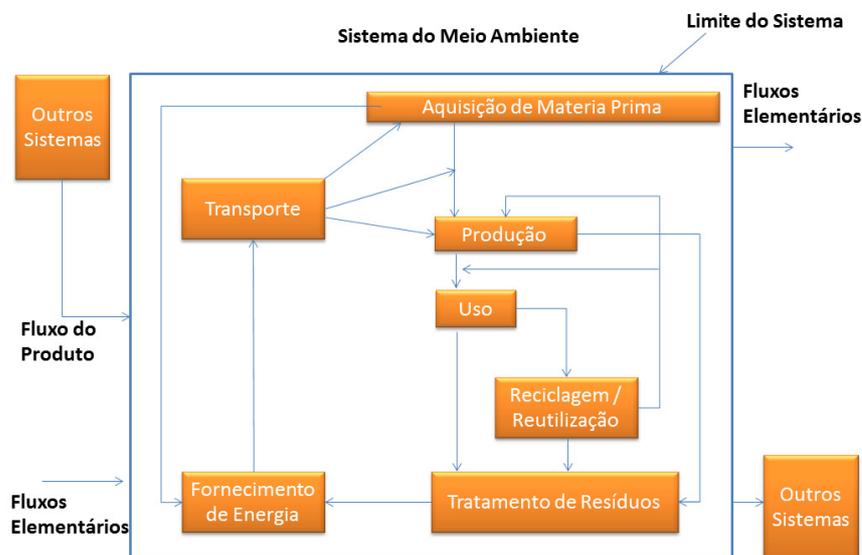


Fonte: Autor Adaptado de Miah et. al. (2017) e Barbieri et. al. (2009)

As metas concretas e as ideias de interesse do LCA devem de ser fixadas no processo de definição do objetivo e adicionalmente, necessita identificar os clientes e os grupos de interesse. Caso haja a necessidade, deve-se explicar qual o papel que a LCA possui no processo de decisão e sua conexão com os pilares estratégicos (por exemplo, econômicos, tecnológicos e sociais). O limite do sistema determina as metas definidas pelo LCA, demarcando a interface entre o meio ambiente, outros sistemas de produtos e quais procedimentos são incluídos ou excluídos do estudo, necessitando a aquisição de dados, sua escala, tipo (específico, médio) e qualidade de dados.

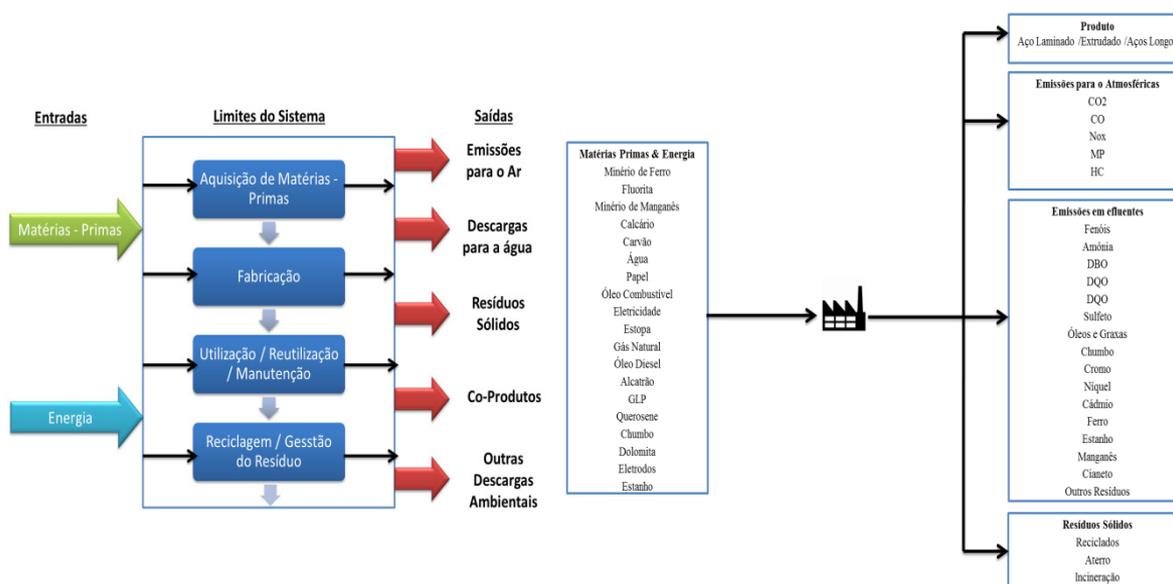
Após a análise do inventário do ciclo de vida (Figura 50), há a necessidade da avaliação de impacto (Figura 51). A avaliação de impacto é a estimativa dos fluxos de materiais e energia obtidos através da análise de inventário, de acordo com os efeitos ambientais. A avaliação de impacto permite o reconhecimento, a síntese e a quantificação dos efeitos ambientais potenciais dos sistemas examinados, gerando informações essenciais para a avaliação de ciclo de vida. As seguintes categorias de impacto são usualmente incluídas na LCA; (a) Aquecimento global (GWP); (b) Depleção de ozônio (estratosférico) (ODP), (c) Geração fotoquímica de ozônio (Troposférico) (POCP), (d) Acidificação (AP), (e) Eutrofização (NP), (f) Toxicidade para seres humanos (HTP), (g) Ecotoxicidade (ETP) (h) Uso da terra. As categorias de impacto descrevem os efeitos potenciais sobre os seres humanos e o meio ambiente realizando o seu fator de caracterização conforme exemplificado na figura 52 (MYAH et. al, 2017; BARBIERI et. al, 2009).

Figura 50 - Ilustração de uma análise de inventário do ciclo de vida de um produto conforme exemplificado pela ISO 14040 (2006)



Fonte: Autor adaptado de Barbieri et. al. (2009)

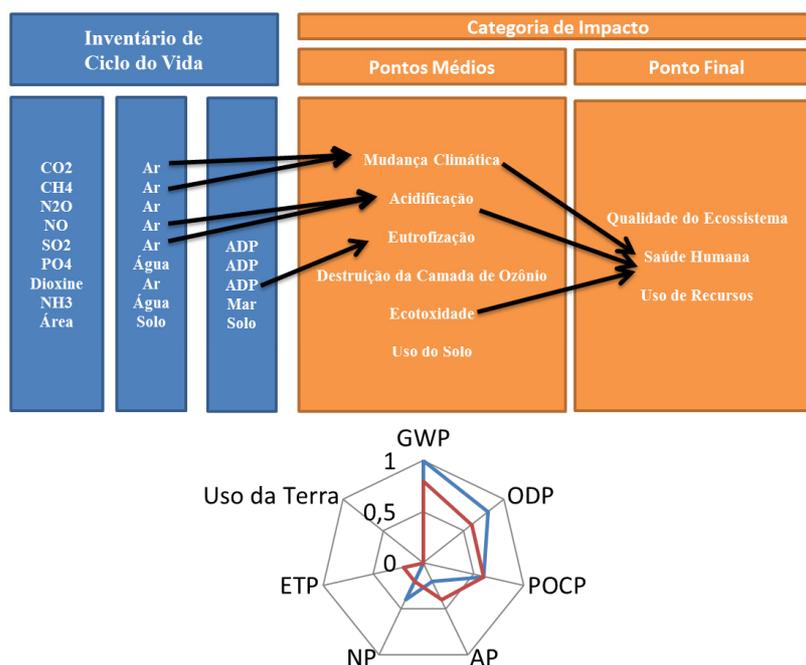
Figura 51 - Classificação e Caracterização de Impacto do Aço



Fonte: Autor adaptado de Barbieri et. al. (2009)

Nota-se que na estrutura “classificação”, os fluxos de material e de energia examinados na análise de inventário estão atribuídos aos efeitos ambientais (categorias de efeito), conforme fixados anteriormente na análise de impacto.

Figura 52 - Avaliação dos Potenciais de Impacto



Fonte: Autor adaptado de Barbieri et. al., 2017

Depois de realizar todas as etapas de avaliação do processo LCA, finaliza-se o processo com a etapa de interpretação, realizando a análise dos resultados, juntamente com a explicação de seu significado e restrições. Os fatos essenciais, baseados nos resultados da análise de inventário e na avaliação de impacto são determinados e confirmados com relação a sua plenitude, sensibilidade e consistência obtendo conclusões que serão construídas, adicionando algumas observações para elaboração de planos de ação, com a finalidade da construção da melhoria do produto (BARBIERI et. al., 2017).

Após o estudo da primeira componente complementar do estudo do LCSA; (a) LCA, define-se o estudo da segunda componente complementar; o (b) SLCA (Social Life Cycle Assessment). Segundo Niero e Hauschilda (2017), o SLCA ou LCA social, é uma técnica de avaliação de impacto social, a qual visa avaliar o potencial impacto social e socioeconômicos dos produtos ao longo de seu ciclo de vida. Impactos sociais se classificam como consequências de pressões positivas ou negativas sobre pontos de vista sociais (ou seja, bem-estar das partes interessadas).

Ainda Niero e Hauschilda (2017) descreve que o objetivo principal da SLCA é promover a melhoria de condições sociais e do desempenho de conjunto socioeconômico de um produto ao longo de seu ciclo de vida para todos os seus “stakeholders” ou partes interessadas. Identificam-se cinco categorias de “stakeholders”: (i) trabalhadores, (ii)

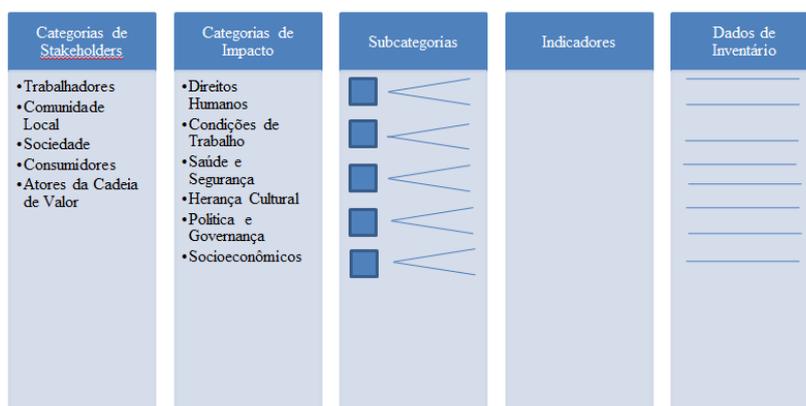
consumidores, (iii) comunidade local, (iv) sociedade e (v) o valor dos “stakeholders” na cadeia. Pesquisas recente sobre SLCA social revela que os dois setores mais explorados em análises LCSA foram a manufatura e a agricultura (NIERO, HAUSCHILDA; 2017).

Segundo a Unep e Setac (2009), necessita-se estabelecer diretrizes para Avaliação do Ciclo de Vida Social de Produtos (SLCA). As dimensões dessas diretrizes não são exclusivas e possuem relações dinâmicas com os processos socioeconômicos; por exemplo, a pressão para preços baixos (processos socioeconômicos) pode atrair fornecedores para permitir trabalhos ilegais (comportamento), uma prática que pode ser aceita em uma determinada sociedade por causa da pobreza sistêmica (capital). Os impactos sociais são muitas vezes percebidos como extremamente complexos e esses impactos resultam em relacionamentos que sempre carregam um conjunto de diferentes visões como uma função (f) de fatores políticos, econômicos, éticos, psicológicos, legais, questões culturais. Os impactos sociais retornam ao sistema de produção e a sociedade e, assim, mudam outros aspectos sociais e os impactos ambientais.

A Unep e Setac (2009) desenvolveram um modelo teórico, no qual classifica a avaliação do SLCA em subcategorias com a finalidade de se construir uma base de avaliação para o SLCA. Esses objetivos de classificação em categorias de impacto apoiam a identificação das partes interessadas (Stakeholders), classificam os indicadores de subcategorias dentro de grupos que tenham os mesmos impactos e suportam impactos adicionais de avaliação e interpretação.

As categorias de impacto devem, de preferência, refletir em categorizações internacionalmente reconhecidas como a declaração da ONU sobre direitos econômicos, sociais e culturais e ECOSOC (Conselho Econômico e Social das Nações Unidas) para os padrões das empresas multinacionais. Na figura 54, pode-se analisar o quadro de avaliação elaborado por Unep e Setac (2009) sobre uma análise de categoria de impacto social.

Figura 53 – Modelo Teórico do SLCA



O SLCA avalia os impactos sociais e socioeconômicos em todas as etapas do ciclo de vida; do berço ao túmulo (Cradle to Grave) ou do berço ao berço (Cradle to Cradle), olhando o ciclo de vida completo de um produto. Essas avaliações relacionam-se aos recursos de extração, processamento, fabricação, montagem, comercialização, venda, uso, reciclagem e disposição, entre outros, que podem ser identificados durante a construção do sistema do produto.

Cada um desses estágios de ciclo de vida (e seus processos de unidade) poderão ser associados aos locais geográficos, onde um ou mais desses processos poderão ser realizados (minas, fábricas, estradas, trilhos, portos, lojas, escritórios, empresas de reciclagem, locais de eliminação). Em cada uma dessas localidades geográficas, os impactos sociais e socioeconômicos podem ser observados em cinco principais categorias de partes interessadas como (i) funcionários; (ii) comunidade; (iii) sociedade e (iv) consumidores (abrangendo os consumidores finais, bem como os consumidores que fazem parte de cada etapa da cadeia de fornecimento). As categorias de partes interessadas fornecem uma base para a articulação das subcategorias. As categorias de partes interessadas propostas são consideradas como principais categorias de grupos potencialmente impactadas pelo ciclo de vida de um produto. Outras categorias de partes interessadas (por exemplo, ONGs, autoridades públicas / estado, gerações futuras) ou subgrupos (por exemplo, gerenciamento, acionistas, fornecedores, parceiros comerciais) podem ser adicionados (UNEP, SETAC; 2009).

**APÊNDICE B**  
**CETESB, PNRS e Política de Logística Reversa**

## **CETESB, PNRS e Política de Logística Reversa**

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é a empresa pública do governo do estado de São Paulo, no Brasil, responsável pelo (i) controle, (ii) fiscalização, (iii) monitoramento e licenciamento de atividades geradoras de poluição no meio ambiente. Seu principal objetivo, sendo o principal pilar estratégico da empresa pública, é preservar e recuperar a qualidade das águas, do ar e do solo, mantendo a integridade do meio ambiente para a população. Uma entrevista com os Gerentes (Engenheiros) responsáveis pela gestão dos resíduos sólidos e logística reversa foi realizada para o entendimento sobre sua operação e atuação sobre as políticas de gestão.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/10) organiza nacionalmente a gestão de resíduos e exige dos setores públicos e privados, transparência no gerenciamento de seus resíduos. No estado de São Paulo, a CETESB monitora e fiscaliza os órgãos públicos e privados referente ao atendimento dos requisitos de gestão de resíduos descritos na PNRS.

Uma das atuações ativas da CETESB referente ao gerenciamento de resíduos sólidos é (i) identificar e atuar os responsáveis referente aos resíduos que afetam diretamente o meio ambiente. Atualmente no caso de eletrônicos, a atuação será realizada, caso uma denúncia ou constatação seja recebida, por exemplo, o equipamento eletrônico (Impressora) ou seu insumo (Cartucho) impacte diretamente o meio ambiente (O descarte de cartuchos de impressão nos afluentes gerou uma poluição, resultando na mortandade de peixes). Outras atuações ativas da CETESB são (ii) o financiamento de galpões de coletas seletivas afim de realizar a gestão do resíduo sólido, (iii) desenvolvimento social dos catadores de resíduos, (iv) disseminação da educação social, promovendo informações sobre a coleta seletiva e quais materiais podem ser reciclados na sociedade e (v) análise dos parâmetros contaminantes que afetam o meio ambiente, como análise do solo, lençóis freáticos e qualidade do ar.

Alguns casos sobre reciclagens no Brasil foram exemplificados como (i) o comprometimento do ANIPE (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos) sobre a reciclagem de pneus e a aplicação do material (pós reciclagem) em produtos como material para brita de pneu, asfalto, tapetes automotivos e ponteira de cerca para fazendas, (ii) recicladoras de eletrônicos no interior do estado de São Paulo e (iii) reciclagem de embalagens de agrotóxicos, as quais necessitam retornar ao fornecedor e o comércio responsável pela venda, necessita controlar o retorno dessas embalagens por Nota Fiscal (Promulgado por Lei). Ainda na gestão de resíduos sólidos, a CETESB tem grandes parcerias estratégicas com outros países;

onde realiza benchmarking e alianças, com a finalidade de se verificar as melhores práticas aplicadas na gestão de resíduos e agregar valor em sua atuação estratégica no estado de São Paulo.

A operação de Logística Reversa de produtos e resíduos da empresa, suporta a implementação da PNRS. Atualmente a CETESB e a FIESP, CIESP e ABREUP estão realizando um acordo (Termo de Logística Reversa), para que as indústrias apresentem e cumpram um plano de Logística Reversa (LR) para a gestão de resíduos. Esse acordo (DD078-2018) tem a finalidade de alavancar a Gestão de Resíduos no Estado de São Paulo e caso a empresa não apresente o plano de LR, o licenciamento de operação emitido pela CETESB (Renovado a cada 4 anos) para indústrias com parques industriais maiores de 10.000m<sup>2</sup>, será passível de não renovação e a indústria poderá sofrer sanções. O licenciamento de operação aprovado pela CETESB é um dos requisitos exigidos pelo Estado de São Paulo para autorização da I.E. (Inscrição Estadual). Essa política de LR é recente e foi promovida e informada à 500 empresas no Estado de São Paulo.

Referente a contextualização dos eletrônicos (Impressora), conforme abordado nos procedimentos metodológicos, a empresa que presta serviço de gestão de resíduos a marca de eletrônicos, ajuda no atendimento de 14 de 15 Requisitos da PNRS. O quadro 5 descreve quais benefícios são atendidos na PNRS, através de sua operação.

Quadro 5 - Objetivos da PNRS que são atendidos com o programa de reciclagem.

<b>Objetivos da PNRS que são atendidos com o programa de reciclagem (Objetivos da PNRS)</b>	<b>Sistema atende?</b>	<b>Relação direta com o processo produtivo?</b>
i – qualidade ambiental	Sim	-
ii – redução, reutilização, reciclagem	Sim	Sim
iii – padrões de produção sustentáveis	Sim	Sim
iv – desenvolvimento de tecnologias limpas	Sim	Sim
v – redução de volume de resíduos perigosos	Sim	Sim
vi – fomentar uso de recicláveis e reciclados	Sim	Sim
vii – gestão integrada	Sim	-
viii – cooperação técnica e financeira	Sim	-
ix – capacitação em resíduos sólidos	Sim	-
x – regularidade no manejo de resíduos	Sim	-
xi – prioridade nas contratações	Viabiliza	-
xii – integração de catadores de recicláveis	Sim	-
xiii – ciclo de vida do produto	Sim	Sim
xiv – melhoria de processos produtivos	Sim	Sim
xv – rotulagem ambiental	Sim	Sim

Fonte: Autor