

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

Marcelo Cassanta Antunes

**UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS
NO PROCESSO DE REMANUFATURA DE CARTUCHOS DE TONERS E
IMPRESSORAS**

Santa Maria, RS
2022

Marcelo Cassanta Antunes

**UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS
NO PROCESSO DE REMANUFATURA DE CARTUCHOS DE TONERS E
IMPRESSORAS**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Administração, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Administração**.

Orientador: Prof. Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto

Santa Maria, RS
2022

Antunes, Marcelo

UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS NO PROCESSO DE REMANUFATURA DE CARTUCHOS DE TONERS E IMPRESSORAS / Marcelo Antunes.- 2022.

98 p.; 30 cm

Orientador: Eugênio Simonetto

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Programa de Pós-Graduação em Administração, RS, 2022

1. Dinâmica de sistemas 2. Remanufatura 3. Resíduo eletrônico 4. Modelagem de sistemas 5. Simulação de computador I. Simonetto, Eugênio II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, MARCELO ANTUNES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Marcelo Cassanta Antunes

**UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS
NO PROCESSO DE REMANUFATURA DE CARTUCHOS DE TONERS E
IMPRESSORAS**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Administração, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Administração**.

Aprovada em **11/05/2022**

Prof. Eugênio de Oliveira Simonetto, Doutor (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Roberto de Gregori, Doutor (UFSM)

Prof. Luiz Cláudio Dalmolin, Doutor (UDESC)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto, meu orientador, pela confiança em mim depositada, pela sua dedicação, pelo caráter e por todo o processo de orientação nesta longa jornada. Muito Obrigado!

Aos meus pais João Luiz e Tânia, por tudo que fizeram por mim até chegar este momento.

À minha noiva e futura esposa Priscila por todo amor, carinho, atenção, paciência e incondicional apoio neste e em todos os demais desafios que a vida nos proporciona. TE AMO MUITO!!

Aos meus irmãos João e Douglas por todo o apoio nesta e em todas as importantes etapas da minha vida.

Aos familiares Cassanta e Antunes, tios, tias, primos e primas, por todos esses anos de amizade, amor e carinho.

Ao meu amigo Glauco pela amizade quase fraternal desenvolvida durante todo o mestrado. Sem o teu companheirismo, expertise, insistência e comprometimento certamente este trabalho não teria chegado ao fim. Por isto te agradeço profundamente, meu querido amigo!!

Aos meus queridos amigos Thaubert, Bruno, Gustavo, Fernando, André, Maico, Amanda, e todos os demais que me apoiaram e incentivaram todos esses anos. AMO VOCÊS!!

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Administração pelos ensinamentos, companheirismo e pelos momentos de aprendizado obtido no mestrado.

Aos meus queridos colegas da Pró-reitoria de Pós-graduação e Pesquisa da UFSM e do Departamento de Administração de Pessoal da UFSC por todo apoio durante essa jornada.

RESUMO

UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS NO PROCESSO DE REMANUFATURA DE CARTUCHOS DE TONERS E IMPRESSORAS

AUTOR: Marcelo Cassanta Antunes

ORIENTADOR: Prof. Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto

O aumento da geração de resíduos oriundo das tecnologias da informação e do consumo de energia elétrica no Brasil mostra a necessidade da busca por soluções ambientais e econômicas. Os desenvolvedores de produtos empregam estratégias principais para resolver esse problema, a saber, uso eficiente de materiais na produção de equipamentos, e o uso de ferramentas como a remanufatura ou reciclagem. A remanufatura inclui o uso de processos industriais que prolongam a vida útil de itens desgastados e incapazes de desempenhar sua função original. As operações de remanufatura apresentam pontos fortes e impasses decorrentes do próprio processo, sendo necessário analisar essas características, considerar temas e avaliar sua aplicação. O processo de remanufatura consiste em trazer um bem já desgastado à qualidade igual ou superior a de um novo bem com uma garantia equivalente. Os benefícios se expandem para aspectos ambientais reduzindo o consumo de energia elétrica em taxas superiores a metade em relação ao processo tradicional, e diminui o consumo de materiais provenientes da natureza de forma significativa. A remanufatura possibilita que haja uma melhora no processo de produção, reduzindo o impacto ambiental causado e os custos de produção. Portanto essa dissertação apresenta o desenvolvimento de modelos de simulação para avaliação dos impactos ambientais e financeiros ocasionados pela extensão do ciclo de vida de impressoras e de cartuchos de toner por meio da remanufatura. Para a modelagem do sistema, foi utilizada a metodologia de Dinâmica de Sistemas mediante uso do simulador Vensim, versão 2022. Para a experimentação, verificação e avaliação do modelo, foram definidos três cenários: o atual, com as taxas atuais de reutilização o otimista, com altas taxas de reutilização do resíduo; e mediano, com taxas menores de reutilização. Na concepção do modelo, optou-se pela construção deste em submodelos, de modo a facilitar a sua experimentação e análise. Os resultados apresentam dados importantes para a aplicação da remanufatura, e os cenários simulados justificam a expansão da remanufatura em maior escala.

Palavras-chave: Dinâmica de sistemas. Remanufatura. Resíduo eletrônico. Modelagem de sistemas. Simulação de computador.

ABSTRACT

A SYSTEM DYNAMICS MODEL FOR EVALUATION OF SCENARIOS IN THE REMANUFACTURING PROCESS OF TONER CARTRIDGES AND PRINTERS

AUTHOR: Marcelo Cassanta Antunes
ADVISOR: Prof. Dr. Eugenio de Oliveira Simonetto

The increase in waste generation from information technologies and electricity consumption in Brazil shows the need to search for environmental and economic solutions. Product developers employ key strategies to solve this problem, namely efficient use of materials in the production of equipment, and the use of tools such as remanufacturing or recycling. Remanufacturing includes the use of industrial processes that extend the life of items that are worn out and unable to perform their original function. Remanufacturing operations have strengths and impasses arising from the process itself, and it is necessary to analyze these characteristics, consider themes and evaluate their application. The remanufacturing process consists of bringing an already worn out good to the same or superior quality as a new good with an equivalent guarantee. The benefits expand to environmental aspects, reducing electricity consumption at rates more than half compared to the traditional process, and significantly reducing the consumption of materials from nature. Remanufacturing makes it possible to improve the production process, reducing the environmental impact caused and production costs. Therefore, this dissertation presents the development of simulation models to evaluate the environmental and financial impacts caused by the extension of the life cycle of printers and toner cartridges through remanufacturing. For the modeling of the system, the System Dynamics methodology was used using the Vensim simulator, version 2022. For experimentation, verification and evaluation of the model, three scenarios were defined: the current one, with the current reuse rates, the optimistic, with high rates of waste reuse; and medium, with lower reuse rates. In designing the model, it was decided to build it in sub-models, in order to facilitate its experimentation and analysis. The results present important data for the application of remanufacturing, and the simulated scenarios justify the expansion of remanufacturing on a larger scale.

Keywords: System dynamics. Remanufacturing. E-waste. Systems modeling. Computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da economia linear	20
Figura 2 - Diagrama da economia circular	24
Figura 3 - Etapas genéricas do processo de remanufatura.....	32
Figura 4 - Componentes da dinâmica de sistemas.....	42
Figura 5 - Fluxograma da remanufatura da impressora.....	49
Figura 6 - Fluxograma de remanufatura do cartucho de toner	50
Figura 7 - Loop causal do modelo “Descarte/Remanufatura”.....	52
Figura 8 - Modelo “Descarte/Remanufatura”.....	52
Figura 9 - Modelo “Emissão Remanufatura”	54
Figura 10 - Modelo “Emissão impressoras descartadas”	57
Figura 11 - Loop causal do modelo “Emissão CO ₂ ”	59
Figura 12 - Modelo “Emissão CO ₂ ”	60
Figura 13 - Loop causal do modelo financeiro.....	62
Figura 14 - Modelo “Custo peças novas”	63
Figura 15 - Modelo “Custo peças remanufaturadas”.....	64
Figura 16 - Modelo “Custo desmontagem/limpeza”	66
Figura 17 - Modelo “Custo manutenção”	66
Figura 18 – Modelo “Custo Remanufatura.....	67
Figura 19 - Modelo “Custo total”	68
Figura 20 - Modelo “Remanufatura cartucho de toner”	70
Figura 21 - Impressoras descartadas x remanufaturas.....	73
Figura 22 - <i>e-waste</i>	74
Figura 23 - Emissão plástico	75
Figura 24 - Redução CO ₂	76
Figura 25 - Custo total	78
Figura 26 - Emissão toner.....	80
Figura 27 - Custo toner.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Conceitos de estratégias de fim de vida (EoL).....	30
Quadro 2 - Substâncias encontradas nos dispositivos eletrônicos.....	37
Quadro 3 - Equações do modelo “ <i>E-Waste</i> ”	53
Quadro 4 - Equações do modelo “Emissão Remanufatura”	55
Quadro 5 - Equações do modelo “Emissão impressoras descartadas”	58
Quadro 6 - Equações do modelo “Emissão CO ₂ ”.....	60
Quadro 7 - Legenda das variáveis	61
Quadro 8 - Equações do modelo “Custo peças novas”	63
Quadro 9 - Equações do modelo “Custo peças remanufaturadas”	65
Quadro 10 - Equações do modelo “Custo desmontagem/limpeza”.....	65
Quadro 11 - Equações do modelo “Custo manutenção”	67
Quadro 12 - Equações do modelo “Custo total”.....	68
Quadro 13 - Equações do modelo “Custo desmontagem/limpeza”.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -.Materiais presentes na composição das impressoras.....	55
Tabela 2 - Média dos custos dos componentes de uma impressora a toner	61
Tabela 3 - Total de impressoras.....	73
Tabela 4 - <i>E-waste</i> de cada cenário (Kg).....	75
Tabela 5 - Emissão referente ao descarte do plástico (Kg)	76
Tabela 6 - Redução da emissão de CO ₂ (Kg)	77
Tabela 7 - Custo total (R\$)	78

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANRAP	Associação Nacional dos Remanufaturadores de Autopeças
DS	Dinâmica de Sistemas
EC	Economia Circulat
EEE	Equipamentos Eletroeletrônicos
EMF	Ellen MacArthur Foundation
LR	Logística Reversa
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TI	Tecnologia da Informação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	OBJETIVOS	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	17
2.2	ECONOMIA CIRCULAR	19
2.3	LOGÍSTICA REVERSA	26
2.4	REMANUFATURA	28
2.4.1	Processo de remanufatura	31
2.4.2	Características de um produto remanufaturável	33
2.4.3	Benefícios da remanufatura	34
2.4.4	Barreiras para remanufatura	35
2.5	RESÍDUO ELETRÔNICO	36
2.5.1	Cartuchos de toners	37
2.6	DINÂMICA DE SISTEMAS	39
2.6.1	Diagrama de laço causal	40
2.6.2	Diagrama de fluxo e estoque	41
3	MÉTODO DE PESQUISA	43
3.1	TIPO DE PESQUISA	44
3.2	ETAPAS DO PROCESSO DE MODELAGEM	44
3.2.1	Entendimento do problema	45
3.2.2	Formulação de hipóteses dinâmicas	45
3.2.3	Desenvolvimento do modelo	46
3.2.4	Experimento teste	46
3.2.5	Avaliação final	46
3.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	46
4	DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS	48
4.1	MODELOS DE REMANUFATURA	48
4.2	MODELOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS	51
5	AVALIAÇÃO, EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
5.1	ANÁLISE DA REMANUFATURA DE IMPRESSORAS	72
5.2	ANÁLISE DA REMANUFATURA DOS CARTUCHOS DE TONERS	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

O modelo de crescimento vivenciado a partir da revolução industrial, impulsionado após as guerras mundiais, tem levado a grandes acúmulos de resíduos eletrônicos, visto que a sociedade considera que os recursos naturais são abundantes e sempre estarão disponíveis, fazendo uso sem preocupação com desperdícios ou descarte. Para diminuir os danos ambientais é preciso buscar abordagens com enfoque em racionalização ambiental e econômica, a partir de modelos voltados não somente ao mercado, mas também ao planeta (LEITÃO, 2015).

A ruptura do modelo linear de extração, transformação e descarte, aplicado na maior parte das empresas, é pregado pela Economia Circular (EC), a partir da busca pela recolocação de materiais nas cadeias produtivas, sem que haja perda de qualidade nesse processo. A EC tem seu foco na construção de produtos com múltiplos ciclos de uso, capazes de reduzir a necessidade de extração de recursos e diminuir o desperdício, permitindo a volta destes materiais, ou parte deles, para a cadeia produtiva, através de processos como a remanufatura, reuso e reciclagem (AZEVEDO, 2015; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

A remanufatura, em especial, é o processo de devolução de um produto usado para uma condição semelhante à nova, por meio de inspeção, desmontagem, limpeza, reprocessamento, montagem e teste. Este processo foca na recuperação do valor agregado de um produto, tornando-o similar à quando ele foi manufaturado pela primeira vez, reduzindo gastos energéticos e custos envolvidos com a produção. Trata-se, portanto, de um procedimento inseparável da Economia Circular, pois devolve à cadeia de produção bens com alto potencial de descarte, prolongando o seu ciclo de vida, tornando possível importantes benefícios sejam ambientais ou econômicos, enquanto reduz o consumo de matéria-prima (HATCHER; IJOMAH; WINDMILL, 2013; GRAY; CHARTER, 2008; CHAOWANAPONG; JONGWANICH; IJOMAH, 2018; MEDEIROS; SIMONETTO, 2019).

A remanufatura pode solucionar os problemas envolvendo a escassez de recursos e a deterioração ambiental, possibilitando o uso de menos matéria-prima, energia e outros insumos se comparados à produção de produtos novos, reduzindo assim, as emissões de resíduos poluentes nas operações. Por se tratar de um processo com potencial para uma melhoria ambiental e empresarial, tem tido crescente atenção mundial, sendo já aplicada em cenários reais em inúmeras empresas, auferindo maiores rendimentos no processo produtivo

(LIU et al, 2017; WAHAB et al, 2018; MATSUMOTO et al, 2016; EGUREN et al, 2018; HUANG; WANG, 2017).

A indústria de Tecnologia da Informação (TI) não era vista como um setor poluidor, cenário este que vem se alterando devido ao ciclo de vida dos produtos estarem ficando cada vez mais curto o que contribui para a geração de grandes volumes de resíduo tecnológico, os quais, muitas vezes, não têm destinação adequada. Uma série de substâncias químicas está presente nos equipamentos eletrônicos, como mercúrio, cádmio, arsênio, cobre, chumbo e alumínio, e podem penetrar o solo, atingindo e contaminando lençóis freáticos, prejudicando o meio ambiente (MATTOS; MATTOS; PERALES, 2008).

Os Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE), entre eles desktops, notebooks, impressoras, cartuchos de toner, aparelhos celulares, entre outros, possibilitam o acesso fácil e rápido a dados, informações e ao conhecimento de forma ilimitada, independente de posição geográfica. Estes são substituídos com maior ou menor periodicidade devido à obsolescência, que se subdivide em três categorias: (i) *obsolescência técnica ou funcional*, que ocorre quando um novo equipamento torna inútil seu antecessor, ou quando o novo se mostra mais eficiente ou viável economicamente; (ii) *obsolescência perceptiva*, a qual se relaciona a questões de *status* ou “pertencimento” relativos ao uso de um determinado equipamento; e (iii) *obsolescência planejada*, promovida pela redução de vida útil de determinado equipamento com o objetivo de promover reposição do item e, conseqüentemente, novas vendas (PAIVA, 2013; PRENDEVILLE; BOCKEN, 2017).

A redução da vida útil dos equipamentos vem sendo notada ao longo da história recente. No caso das impressoras, utilizadas tanto em ambientes domésticos quanto corporativos, admite-se que a vida útil varie de dois a oito anos. É preciso, portanto, buscar formas de amenizar as conseqüências do consumo elevado, que, com a obsolescência programada e o intenso ritmo de inovação, acaba por transformar grande parte dos equipamentos eletrônicos em sucata tecnológica em curtos períodos de tempo (BOUSQUIN et al, 2012; ROCHA; CERETTA; CARVALHO, 2010).

Os cartuchos de toners fazem parte desse conjunto de equipamentos eletrônicos, e usualmente se transformam em resíduo eletrônico (*e-waste*) quando ficam obsoletos, sendo substituídos por produtos novos. Estudos recentes com técnicas de modelagem computacional vêm sendo realizados para avaliar melhorias nos cenários de descarte de resíduo eletrônico, porém sem o foco em remanufatura (SCHNEIDER et al, 2015), ou com remanufatura voltada a computadores (SIMONETTO et al, 2016).

A partir de uma perspectiva de inserção de novos modelos de negócios para o desenvolvimento sustentável, a remanufatura vem sendo apontada como um caminho possível, pois se torna algo economicamente viável à medida que reduz o consumo de matérias-primas e diminui as emissões de resíduos.

A seguir serão expostos o problema, objetivos e justificativa da pesquisa.

1.1 PROBLEMA

O avanço das tecnologias em diferentes dispositivos eletrônicos vem se expandindo rapidamente nos últimos anos, e como consequência a troca destes dispositivos acontece rotineiramente. Todavia, o crescimento na utilização destes equipamentos não tem sido acompanhado pelo descarte correto, acarretando diversos problemas ambientais (XU; ZENG; HE, 2017).

O objetivo dos produtos eletrônicos é trazer comodidade e conforto ao usuário, porém o seu acúmulo gera graves consequências tanto em aspectos ambientais como econômicos. O seu expresso uso e a constante evolução tecnológica, motivados pelo alto consumo imposto e obsolescência programada, geram um montante de resíduos praticamente imensuráveis (SILVA, 2013). As novas tecnologias substituem rapidamente milhões de aparelhos analógicos que conduzem a sua disposição em aterros sanitários prescritos, apesar do potencial de impactos adversos sobre o meio ambiente (MEDEIROS; SIMONETTO, 2019).

O processo de industrialização e a dependência da sociedade por novas tecnologias somadas do crescimento populacional estão sobrecarregando o meio ambiente. A busca pelo desenvolvimento sustentável se tornou algo obrigatório e legal, sejam para as indústrias seja para os indivíduos de modo geral (BULMUS; ZHU; TEUNTER, 2014; SIMONETTO et al, 2016).

De acordo com relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), o resíduo eletrônico global produzido anualmente é de 50 milhões de toneladas, com previsão de atingir 65,4 milhões de toneladas em 2020, incluindo computadores e impressoras. Tradicionalmente, o consumidor opta pelo descarte destes resíduos eletrônicos sem pensar na extensão do seu ciclo de vida, onde boa parte destes poderia ser reutilizada. Esta atitude colabora significativamente para o crescente volume de resíduos eletrônicos (TURKI; REZG, 2018; WANG et al, 2014).

Segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil atingiu um total de 79 milhões de toneladas na última década. Deste montante coletado, apenas 59,5% teve destinação apropriada. No mesmo período, a quantidade de resíduos que segue para unidades inadequadas, como lixões e aterros controlados, passou de 25 para 29 milhões de toneladas (ABRELPE, 2020).

O gerenciamento de resíduo eletrônico (*e-waste*) é um dos problemas de poluição que cresce rapidamente em todo o mundo. Entre os problemas gerados pelo descarte inadequado destaca-se a poluição de rios, lençóis freáticos e do meio ambiente em geral. Com o aumento do consumo mundial e o contínuo desenvolvimento tecnológico, muitos produtos são descartados até mesmo antes do fim da sua vida útil (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013; AYDIN et al, 2018).

Entre os resíduos eletrônicos mais comuns, têm-se as impressoras e os cartuchos de toners, que são os mais contaminantes devido aos componentes da própria carcaça do equipamento composta de plástico, resina e pigmentos, e também devido ao pó de fumo que contém metais pesados, entre eles: o cádmio, ouro, cobre, mercúrio, chumbo, berílio, carbono com polímeros, óxidos metálicos como manganês e alguns sais (GUARNIERI; HAAS; MONTEIRO, 2013; MOURA et al., 2012).

Como mencionado anteriormente, as impressoras fazem parte desse conjunto de equipamentos eletrônicos. Usualmente, seus usuários optam pelo descarte total quando ficam obsoletas ou param de funcionar, sendo substituídas por outras novas. Seus cartuchos de toners são utilizados de forma contínua e são normalmente trocados antes de seu ciclo de vida acabar, normalmente descartados de forma errada. Assim, questiona-se: Qual impacto da remanufatura de impressoras a toner? Tendo em vista que a geração de resíduos eletrônicos, em especial o cartucho do toner, qual o impacto ambiental e financeiro da utilização de produtos remanufaturados a partir dos cartuchos de toners descartados?

1.2 JUSTIFICATIVA

A poluição ambiental tem obtido bastante atenção nos meios acadêmicos, público e organizacional. Com o avanço das tecnologias e as inovações de seus produtos, o resíduo eletrônico se apresenta para o meio ambiente como um novo inimigo. Concomitantemente ao potencial nocivo, esses resíduos também oferecem oportunidades de inovação e criação de

novos produtos, minimizando, assim, o impacto no meio ambiente (MEDEIROS; SIMONETTO, 2019).

A remanufatura se apresenta como um processo sólido, tanto ambientalmente como economicamente, para que se consiga alcançar um futuro mais sustentável. A recuperação dos produtos no fim de vida útil, acrescentando mais tempo ao ciclo de vida original do produto, é uma solução promissora para responder aos constantes aumentos no nível da poluição ambiental e também auxiliará para diminuir a temperatura do nosso planeta, além de contribuir para a aplicação da regulamentação ambiental correta (AYDIN; KWONG; JI, 2015).

O processo da remanufatura possibilita a redução do descarte incorreto, pois no caso da possibilidade do pós-uso, o produto retorna para o ciclo produtivo, evitando assim o despejo em aterros sanitários, por exemplo. Esta recuperação de produtos em fim do ciclo de vida é mais atrativa do que o descarte, pois traz benefícios tanto ambientais como econômicos, enquanto reduz o consumo de matéria-prima (VALLE; SOUZA, 2014; TURKI; REZG, 2018; SASIKUMAR; KANNAN; HAQ, 2010; CHAOWANAPONG; JONGWANICH; IJOMAH, 2018).

Ainda, a remanufatura facilita múltiplos usos dos produtos ao fornecer muitos ciclos de vida, e assim, contribui para sociedades mais sustentáveis através da redução do consumo de matérias-primas e energia. Portanto, é considerada como um elemento chave da estratégia para o desenvolvimento da sustentabilidade, se tornando fundamental devido à escassez dos recursos e para a conservação do meio ambiente (YANG et al., 2015; GOLINSKA et al, 2015).

Para Lund (2012) os mercados de remanufatura estão relacionados à produção de peças nos seguintes setores: aeroespacial (componentes e subsistemas de aeronaves), equipamentos pesados e *off-road* (HDOR) (por exemplo, pilar Cater), motor peças de veículos, peças de TI (principalmente cartuchos de toner), dispositivos médicos (dispositivos de uso único) e pneus (para caminhões e ônibus).

Para a United States International Trade Commission (2012) o setor de remanufatura de peças de TI ganhará espaço principalmente para reduzir o resíduo eletrônico. No mercado mundial, dentre os produtos comumente remanufaturados estão as peças automotivas, móveis de escritório, fotocopiadoras, impressoras, cartuchos de toners e computadores (HERMANSSON; OSTLIN; SUNDIN, 2007; SHAH; GOSAVI; NAGI, 2010; OTIENO; LIU, 2016; MALEKI et al., 2017; NAKAJIMA et al, 2019).

Dados apresentados pelo Reino Unido mostram distribuições semelhantes no mercado de remanufatura. Naqueles países, os cartuchos de tinta e toner remanufaturados contemplam a maior parte do mercado, seguidos pelos automotivos, equipamentos *off-road* e bombas e compressores (CHAPMAN et al, 2010). Na Europa como um todo, estima-se que a remanufatura gere cerca de 30 bilhões de euros em volume de negócios e emprega cerca de 190.000 pessoas. Embora substancial, a proporção de remanufatura para fabricação é de apenas 1,9%, o que indica amplo espaço para melhorias (EUROPEAN REMANUFACTURING NETWORK, 2015)

Portanto, para se evitar os riscos de contaminação tanto para a natureza como para os seres humanos e possível geração de novo produto, conforme caracterizado anteriormente, faz-se necessário aplicar a remanufatura de resíduos eletrônicos. Nesta pesquisa, estudaremos a remanufatura de impressoras e de cartuchos de toners, pois se tratam de dispositivos onde seu descarte incorreto traz alto risco para a saúde humana e danos ambientais que possuem expressivos potenciais para ser objetos de remanufatura.

1.3 OBJETIVOS

Um objetivo claro é o ingrediente mais importante para um estudo de modelagem bem-sucedido. Obviamente, um modelo com um objetivo claro ainda pode ser enganoso, pesado e difícil de entender. Mas um objetivo consistente permite que seus usuários façam perguntas que revelem se um modelo é útil para resolver o problema de que se preocupam.

Portanto o objetivo desta dissertação é desenvolver e avaliar modelos de dinâmica de sistemas e propor cenários para apoio ao processo decisório envolvendo o impacto ambiental e financeiro na remanufatura de impressoras e de cartuchos de toner. Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

- I.Desenvolver uma base teórica sólida para o desenvolvimento do modelo;
- II.Compreender o processo de remanufatura de impressoras e de cartuchos de toner;
- III.Projetar uma solução aceitável para a resolução do problema da coleta;
- IV.Implementar em um ambiente computacional a solução desenvolvida;
- V.Simular e avaliar o comportamento e desempenho do modelo de apoio à decisão desenvolvido, utilizando dados reais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste estudo, o referencial teórico conta com seis tópicos principais: o primeiro apresenta uma discussão a respeito da Política Nacional de Resíduos Sólidos. O segundo focará na economia circular. No terceiro tópico será abordada a logística reversa. O quarto remete à remanufatura em termos de definições e diferenciações com outras práticas comumente usadas na recuperação de produtos. O quinto abordará a questão do resíduo eletrônico. E o sexto irá trazer conceitos da dinâmica de sistemas, método este utilizado neste estudo.

2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A gestão dos resíduos sólidos é um dos principais problemas ambientais enfrentado pelo poder público brasileiro. Por ser um país continental e apresentar diferenças regionais significativas, qualquer planejamento e gerenciamento proposto no Brasil deve observar a realidade de cada região. Assim como nos demais países em desenvolvimento, o crescimento socioeconômico brasileiro não acompanhou a implantação de tratamento e destinação de resíduos com tecnologias adequadas. Ainda é possível encontrar locais inadequados e proibidos para disposição, como os “lixões” a céu aberto, e poucas iniciativas de reaproveitamento e reciclagem dos resíduos descartados (VENTURA, 2018).

Com a necessidade de uma legislação mais eficiente acerca da gestão dos resíduos sólidos, o marco regulatório brasileiro foi introduzido por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. A PNRS introduziu conceitos inovadores, destacando-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto e a logística reversa, responsáveis direto na reintegração dos resíduos em um novo ciclo econômico (BRASIL, 2010; COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020; PINA; FLORENCIO; COSTA, 2021).

A Lei nº 12.305/2010 conceitua resíduos sólidos como “materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para

isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010).

A PNRS foi um marco na gestão de RSU no Brasil, preenchendo uma lacuna existente há muito tempo na legislação ambiental brasileira. Com base nessa regulamentação, o Brasil passou a ter uma poderosa ferramenta para reduzir a geração de resíduos e combater poluição. Seu advento apontou a necessidade de articulação institucional envolvendo a União, os Estados e os Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral, na busca de soluções para os problemas referentes aos resíduos sólidos (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020; VEIGA, 2019).

Entretanto, ainda há muitos desafios em sua implementação ao longo do país. Alguns exemplos destes são a falta de fundos governamentais, falta de capacidade técnica e administrativa, falta de conscientização do público em relação à geração de resíduos e insuficiência da estratégia de descentralização do governo federal na implementação da agenda (CETRULO et al., 2018; BITENCOURT; HERNÁNDEZ, 2022).

Em dados divulgados pelo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021, relatório este realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), mostra que a geração de RSU teve influência direta da pandemia da COVID-19 em 2020, visto que as dinâmicas sociais foram abruptamente alteradas. Ao todo, foram, aproximadamente, 82,5 milhões de toneladas geradas, sendo 225.965 toneladas por dia. Com isso, cada brasileiro gerou em média 1,07 Kg de resíduo por dia. Um aumento de 4% em relação a 2019, onde foram gerados 79 milhões. A região com maior geração de resíduos é a sudeste, com 113 mil toneladas diárias e 460 kg/hab/ano, enquanto a região Norte representa aproximadamente 4% do total gerado, com cerca de 6 milhões de toneladas/ano e 328 kg/hab/ano (ABRELPE, 2021).

Com o aumento da geração de RSU, conseqüentemente houve um aumento na coleta, totalizando 76,1 milhões de toneladas coletadas em 2020, implicando uma cobertura de coleta de 92,2%, comparado com o ano anterior, onde a coleta totalizou 72,7 milhões de toneladas e a cobertura foi de 92%. A região sudeste é responsável pela maior massa coletada, totalizando quase 40 milhões de toneladas por ano, seguida pela região nordeste, com pouco mais de 16,5 milhões e a região sul, com cerca de 8,5 milhões de toneladas coletadas (ABRELPE, 2021).

Em relação à disposição final, alternativa de destinação ambientalmente adequada prevista na PNRS, a maior parte dos RSU coletados seguiu para disposição em aterros sanitários, totalizando 46 milhões de toneladas ou 60% dos resíduos totais coletados. Por

outro lado, ainda estão em operação áreas de disposição inadequadas e estas receberam 30,2 milhões de resíduo, quase 40% do total coletado (ABRELPE, 2021).

Mesmo com uma legislação restritiva e com os esforços empreendidos pelo poder público, a destinação inadequada de RSU ainda se faz presente em todo o país. Práticas habituais como esta provocam diversos impactos no meio ambiente, contaminando solos e corpos d'água, enchentes, proliferação de doenças, emissão de gases causadores do efeito estufa, além de inviabilizar atividades econômicas nas áreas atingidas (RODRIGUES, 2017).

Nesta perspectiva, a gestão de RSU desempenha um importante papel na economia circular, uma vez que permite implementação da hierarquia dos resíduos determinando uma ordem de prioridade, iniciando pela prevenção, passando pela preparação para a reutilização, reciclagem e valorização energética, e finalizando na eliminação, como é o caso da disposição em aterros (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020).

2.2 ECONOMIA CIRCULAR

A necessidade de alcançar níveis de produção e consumo sustentáveis tem instigado acadêmicos, pesquisadores e ambientalistas no mundo todo. O esgotamento acelerado dos recursos naturais, resultante da falta de consciência ambiental do ser humano, aliada a implementação de legislações rigorosas obrigam a sociedade a adotar práticas sustentáveis a fim de reduzir o desperdício e consumo de matérias-primas nos processos industriais, buscando a preservação do meio ambiente e a extensão do ciclo de vida dos produtos (JABBOUR et al., 2019; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020; MURANKO et al. 2019).

O sistema linear de produção (figura 1), predominante nos dias atuais, utiliza insumos puros e intactos na fabricação e comercialização de produtos que serão descartados ao final do seu ciclo de vida. Uma vez que este modelo foca exclusivamente no consumo e desconsidera os impactos ambientais que estão associados à extração excessiva de recursos virgens, perdas significativas devem acontecer ao longo do processo de produção e consumo, resultando em grandes desperdícios e poluições. Diante disso, organizações globais, governos e empresas têm reconhecido a importância de mudar para uma economia mais sustentável e que seja capaz de fechar o ciclo material, visto que a redução da extração da matéria-prima e de combustíveis fósseis apenas retardará o desaparecimento do capital natural (REIKE;

VERMEULEN; WITJES, 2018; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019; SCOMAZZON, 2019; MURANKO et al. 2019; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Figura 1 - Diagrama da economia linear



Fonte: Scomazzon (2019)

A economia circular (EC) atua diretamente nesta perspectiva, se opondo ao sistema linear e proporcionando uma transformação no conceito de desenvolvimento, pois considera o impacto do consumo de recursos, bem como, o desperdício no meio ambiente. De acordo com a Ellen MacArthur Foundation (EMF) (2015), organização que se destaca no estudo deste novo modelo econômico, o objetivo da EC é “manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, distinguindo entre ciclos de materiais técnicos e biológicos”. Ainda, a economia circular é classificada como um *Closed-Loop Supply Chain*, onde o produto usado é retirado de circulação e passa por um processo de recuperação antes de ser recolocado no mercado (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; CE100 BRASIL, 2017; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019; SCOMAZZON, 2019; SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2016; PINHEIRO et al., 2019; MEDEIROS, 2020).

A economia circular é um modelo que se inspira no funcionamento da natureza para repensar as práticas econômicas. Ela é indissociável da inovação e do design de produtos e sistemas e inclui-se num quadro de desenvolvimento sustentável baseado no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos, permitindo a redução do consumo de matérias-primas, energia e água.

Na economia circular, a geração de resíduos é minimizada, pois os recursos são mantidos em uso por um tempo maior, evitando assim a reciclagem, proporcionando não apenas benefícios para o meio ambiente, mas também contribuindo para o crescimento econômico de um país. Para alcançar uma taxa de crescimento econômico desejado e atender às demandas da população crescente, um país deve adotar práticas sustentáveis que mirem uma economia rica em recursos. Exemplos como Alemanha, China e Japão já criaram

políticas visando à adoção de práticas de economia circular, pressionando todas as empresas de diversos ramos a buscarem sistemas de produção mais limpos (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019; BAG; GUPTA; FOROPON, 2018; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; HAZEN; MOLLENKOPF; WANG, 2017; MISHRA et al., 2019; WINANS; KENDALL; DENG, 2017).

Diante da vasta literatura encontrada a respeito do tema, não é possível apontar um único fundador ou período responsável pela origem da economia circular. Diversos autores de diferentes escolas do pensamento trouxeram contribuições para evolução da EC, transformando-a em um campo crítico no âmbito acadêmico, sendo observado um aumento significativo na produção de artigos na década mais recente. Estas escolas do pensamento desenvolveram o conceito da economia circular de uma forma genérica, porém todas concordam que com a EC é possível neutralizar os desequilíbrios entre a oferta e a demanda de recursos naturais (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020; SCOMAZZON, 2019; FRAGA, 2017; VEIGA, 2019).

A economia circular refere-se a uma economia industrial regenerativa e restauradora, tendo como princípios a preservação do capital natural, o aprimoramento da extração de recursos naturais e a minimização dos riscos sistêmicos, podendo ser aplicada em qualquer escala. Nesta perspectiva, os produtos devem ser projetados a ponto de facilitar a sua desmontagem, mantendo um alto nível de utilidade de seus materiais e componentes, para que possam ser reutilizados, remodelados ou reciclados. Trata-se de um conceito que visa à prevenção do esgotamento de recursos naturais, reutilizando grandes quantidades de materiais recuperados de produtos em fim de vida, evitando-se, assim, a eliminação de produtos tóxicos e a erradicação do desperdício (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; VEIGA, 2019; PISITSANKKHAKARN; VASSANADUMRONGDEE, 2020; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019; HAZEN; MOLLENKOPF; WANG, 2017; ZHIJUN; NAILING, 2007; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Entretanto, sua aplicação prática nos processos industriais atuais se intensificou a partir da década de 1970, resultante das pesquisas realizadas por grupos acadêmicos e empresas. (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; MURANKO et al 2019; SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2019). Seus conceitos têm sido estudados e aprimorados pelas seguintes escolas do pensamento: Ecologia Industrial (CLIFT; DRUCKMAN, 2016), *Design* Regenerativo, Economia de Performance (STAHEL, 2010), Biomimética (BENYUS, 1997), *Cradle to Cradle* (do berço ao berço) (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2014), *Blue*

Economy (economia azul) (PAULI, 2010) e Capitalismo Natural (HAWKEN, LOVINS; LOVINS, 2000).

A ecologia natural, conceito estudado e aprimorado desde os anos 70, investiga e conecta os fluxos de materiais e energia presentes nos ecossistemas industriais, que visa criar processos em ciclos fechados, de acordo com as necessidades ecológicas locais e observando o impacto global desde o início. Reproduz um ecossistema em que os resíduos de uma organização sejam trocados com outra localizada no mesmo ramo fabril. Atualmente, observa-se a atuação deste conceito na implementação de parques eco industriais e, dada a sua natureza multidisciplinar, é possível ser aplicada no setor de serviços (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019; KAZAZIAN, 2005; CLIFT; DRUCKMAN, 2016).

Desing regenerativo surgiu nos anos 70 nas pesquisas do professor John T. Lyle, onde formatou ideias para serem empregas em qualquer sistema, implementando, assim, o princípio da estrutura da economia circular. Caracteriza-se como um método onde os sistemas sejam conduzidos de forma que estes reparam ou melhoram as fontes de energia e materiais consumidos nos próprios sistemas, transformando-os em processos sustentáveis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019).

Desenvolvida em 1976 pelo arquiteto e economista Walter Stahel, a economia de performance visa o estabelecimento de um cenário econômico em ciclos fechados, trazendo vantagens para o mercado e para o meio ambiente. Seu objetivo principal é a prevenção do desperdício por meio da extensão do ciclo de vida e restauração dos produtos e da produção de bens de consumo duráveis. Stahel ainda criou a expressão “*cradle to cradle*” fundou o Instituto Product Life em 1982, com o intuito de aumentar a durabilidade dos produtos, evitando a perda de materiais e transformando estes produtos em serviços (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019; STAHEL, 2010).

Biomimética, constituída por Janine Benyus em 1997, é uma abordagem que analisa sistemas naturais com o intuito de reproduzi-las em processos de design e engenharia. Baseia-se em três princípios fundamentais: natureza como um modelo, onde se investiga os modelos naturais e emula suas técnicas; natureza como medida, onde se avalia a sustentabilidade de novas tecnologias, produtos e serviços utilizando um padrão do meio ambiente; e natureza como mentora de um processo de aprendizado e o que é possível de se obter por meio dela

(ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019; BENYUS, 1997).

Cradle to cradle (do berço ao berço) é uma escola de pensamento que classifica qualquer material como nutrientes, podendo ser técnico ou biológico. Aperfeiçoada por Michael Braungart e Bill McDonough em 2002, este último aluno de John Lyle, trata-se de uma gestão dois tipos de fluxos de matérias: biológicos e técnicos. Os biológicos são àqueles reincorporados à biosfera com segurança e possuem a capacidade de regenerar o capital natural. Os técnicos são os materiais finitos, que devem permanecer no ciclo produtivo, a fim de diminuir a extração dos recursos naturais (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2014; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019).

A *blue economy* foi desenvolvida por Gunter Pauli, em 2004, propondo mudanças na economia baseando-se no funcionamento dos ecossistemas para gerar riqueza, empregando conhecimentos sobre a natureza para atingir níveis significativos de eficiência e mantendo um equilíbrio entre o ser humano, a natureza e a economia. Pauli ainda acredita que a economia verde funciona, mas não bastante para minimizar os efeitos negativos causados pelo homem no meio ambiente (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SCOMAZZON, 2019; VEIGA, 2019; PAULI, 2010).

O capitalismo natural, desenvolvido por Amory Lovins, baseia-se na premissa de uma economia global onde os interesses ambientais e comerciais se complementam, reconhecendo as interdependências existentes entre capital natural, capital humano e produção. Quatro princípios o norteiam: (I) produtividade radical dos recursos, onde mudanças no design, na produção e na tecnologia são essenciais para o uso mais eficiente dos recursos; (II) biomimetismo, onde a produção é inspirada na biologia visando a eliminação do desperdício; (III) economia de serviços e de fluxos, onde o valor gerado pelo modelo tradicional de venda de bens é substituído pelo fluxo contínuo de serviços; e (IV) investimento em capital natural com intuito de reverter, restaurar e expandir a oferta de ativos naturais (VEIGA, 2019; HAWKEN; LOVINS; LOVINS, 2000).

A economia circular promove o desenvolvimento de novas relações entre as empresas, que passam a ser simultaneamente consumidoras e fornecedoras de materiais que são reincorporados no ciclo produtivo. Trata-se de um modelo de economia industrial intencionalmente "restaurador", projetado para recuperar de forma circular o produto de suas atividades. Em estudo divulgado no Brasil, a EMF apresenta o diagrama de sistema da economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Figura 2 - Diagrama da economia circular

DEFINIÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR

PRINCÍPIO

1

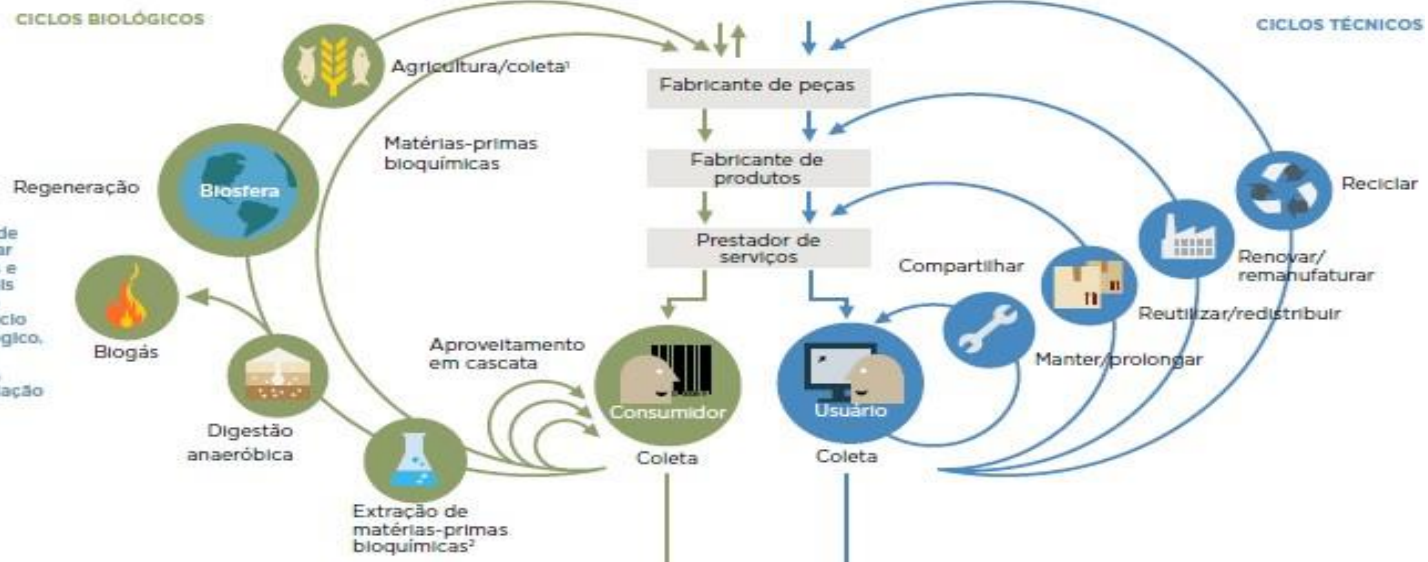
Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis
 Alavancas ReSOLVE: regenerar, virtualizar, trocar



PRINCÍPIO

2

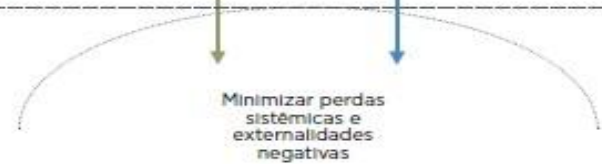
Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais em uso no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico.
 Alavancas ReSOLVE: regenerar, compartilhar, otimizar, promover a criação de circuitos



PRINCÍPIO

3

Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio
 Todas as alavancas ReSOLVE



Fonte: Ellen Macarthur Foundation (2015).

Neste diagrama proposto, nota-se que a economia circular apresenta dois ciclos: o biológico e o técnico. Frequentemente, os produtos são desenhados considerando o ciclo de vida linear, ao invés de adotarem um ciclo fechado, onde o descarte se transforma em uma nova produção. Todos os componentes deveriam ser projetados para circular infinitamente depois da sua vida útil, sendo espontaneamente incorporados por outro e passando a integrar um novo ciclo. No entanto, para esse raciocínio funcionar, é necessário compreender os fluxos de materiais existentes no ciclo biológico e no ciclo técnico (MEDEIROS, 2020; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; KAZAZIAN, 2005; CARDOSO, 2012).

Os nutrientes biológicos correspondem aos ciclos da natureza e alimentem a biosfera. São programados para reintegrar a biosfera, podendo ser jogada no chão ou então sendo despejada em uma horta servindo de alimentos para outros organismos e devolvendo nutrientes à superfície. Os biociclos possuem a finalidade de organizar um sistema de produção e consumo conectados com os ciclos naturais, e se sustente de modo que não exceda as limitações da sua produção e retorne ao ecossistema como um resíduo biodegradável (SCOMAZZON, 2019; BRAUNGART; MCDONOUGH, 2014; KAZAZIAN, 2005).

Os nutrientes técnicos correspondem aos ciclos dos sistemas industriais ou tecnociclos e alimentam a tecnosfera. Em sua maioria, possuem diversos componentes de materiais relevantes à indústria, e por isto são programados para reintegrar os sistemas industriais dos quais são originados. Para preservar a sua qualidade ao originar um novo produto, ao final da sua vida útil, ele pode ser classificado como *upcycled* ao invés de reciclado, sendo projetado para desmontado e separado dos nutrientes biológicos (SCOMAZZON, 2019; BRAUNGART; MCDONOUGH, 2014; KAZAZIAN, 2005).

Os tecnociclos atuam de forma independente e não interferem no meio ambiente, pois quando um produto chegar ao final da sua utilidade ou o consumidor optar por um modelo novo, a empresa poderá desmontá-lo e utilizar seus materiais na produção de outro produto. Desta forma, é possível que novos sistemas industriais sejam criados, sendo uma fábrica produzindo e outra “remanufaturando” e devolvendo o produto ao mercado. Repensar este ciclo é de suma importância, principalmente nos produtos tecnológicos onde a durabilidade não é vista como uma boa estratégia comercial, pois estão sujeitos a frequentes atualizações (SCOMAZZON, 2019; BRAUNGART; MCDONOUGH, 2014; KAZAZIAN, 2005; VEIGA, 2019).

Na última década, a economia circular tem obtido uma posição de destaque, reunindo inúmeros pesquisadores com o intuito de alcançar uma sociedade mais sustentável, seja no ambiente de negócios ou no âmbito das políticas públicas. E diversas estratégias de cadeia de

suprimentos de circuito fechado (*Closed-Loop Supply Chain*), como a reutilização, reparo, reciclagem e remanufatura, podem contribuir para atingir este objetivo (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; HAZEN; MOLLENKOPF; WANG, 2017; JABBPUR et al. 2017; BURGUER et al. 2019; VELTE; SCHELLER; STEINHILPER, 2018; KRYSTOFIK et al., 2018; MEDEIROS, 2020).

A remanufatura, que faz parte do ciclo técnico e será abordada mais adiante, vem ocupando uma posição de destaque, pois possui potencial para estimular a sustentabilidade. Sendo um subconjunto da economia circular e considerada globalmente uma poderosa ferramenta para estender o ciclo de vida dos recursos, a remanufatura se apresenta como o único modelo de negócios circular capaz de oferecer garantia aos produtos devolvidos ao mercado (SINGHAL; TRIPATHY; JENA, 2020; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018; MEDEIROS, 2020; ISMAIL et al., 2017; BAG; GUPTA; FOROPON, 2018; GOLINSKA; KUEBLER, 2014; SITCHARANGSIE; IJOMAH; WONG, 2019; YANG et al., 2015).

2.3 LOGÍSTICA REVERSA

Uma produção limpa requer um planejamento adequado aliado à utilização de materiais de fácil reciclagem e decomposição, para que sejam gerados menos resíduos prejudiciais ao meio ambiente no final do processo produtivo. E a logística reversa (LR) atua diretamente neste pensamento, possibilitando a reinserção econômica e revalorização dos resíduos gerados, assegurando uma recuperação sustentável (SHIBAO; MOORI; SANTOS, 2010; GUARNIERI, 2011).

Guarnieri (2011, p. 48) descreve a LR como um “processo de planejamento, implementação e controle do fluxo de matérias-primas, estoque em processamento e produtos acabados e seu fluxo de informação do ponto de consumo até o ponto de origem, com o objetivo de recuperar valor ou realizar um descarte adequado”. Trata-se de um processo complementar à logística tradicional, pois enquanto a primeira tem por objetivo principal levar os produtos até o consumidor final, a LR os traz de volta à origem, completando o ciclo (LACERDA, 2002; SHIBAO; MOORI; SANTOS, 2010).

A Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define a logística reversa como um “instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada”. A

mesma legislação define a aplicação obrigatória da LR nos casos de: (i) agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; (ii) pilhas e baterias; (iii) pneus; (iv) óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; (v) lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista e (vi) produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Normalmente, as empresas nestes ramos realizam o recolhimento dos produtos ou equipamentos de forma completa, mesmo os componentes que não serão usados. Por exemplo, ainda que consiga reutilizar os invólucros das pilhas e baterias, a empresa tem de recolher o produto inteiro, inclusive a parte química, cuja recuperação não apresenta muita vantagem. As metalúrgicas também precisam realizar o mesmo procedimento, recolhendo um veículo inteiro mesmo que só aproveitará as partes metálicas, descartando os pneus, estofamentos, entre outros. (SHIBAO; MOORI; SANTOS, 2010).

Historicamente ligada a questões legais, ambientais e econômicas, o estudo da logística reversa se faz imprescindível no contexto organizacional das empresas, visto que é por meio deste processo que as organizações se tornam ecologicamente mais eficiente, reduzindo a quantidade dos produtos utilizados por meio da reciclagem e do reuso. Como benefícios, as empresas obtêm uma valorização da imagem e prestígio perante seus acionistas e, principalmente, no mercado onde atua (SHIBAO; MOORI; SANTOS, 2010; CARTER; ELLRAM, 1998).

Ainda, a LR apresenta diversas vantagens, tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente. A primeira delas é o retorno de resíduos sólidos para as empresas de origem, evitando, assim, a contaminação ambiental. Também podemos citar a economia nos processos produtivos das empresas, pois uma vez que os resíduos sólidos entram novamente na cadeia produtiva, diminui-se o consumo de matérias-primas. A criação de um sistema de responsabilidade compartilhada para o destino dos resíduos sólidos e o estímulo ao uso de tecnologias mais limpas e de embalagens e produtos que sejam mais facilmente recicláveis também são benefícios oriundos da logística reversa (VEIGA, 2019).

Conforme Veiga (2019), as funções de cada setor no sistema da logística reversa podem ser definidas da seguinte maneira: (i) os consumidores devolvem os produtos que não são mais usados em locais especificados para coleta; (ii) os comerciantes providenciam estes locais; (iii) as indústrias retiram os produtos para reutilizá-los ou reciclá-los e (iv) o governo cria campanhas de educação e sensibilização para os consumidores, instrumentos legais e de incentivo econômico e fiscaliza o sistema.

Conforme Shibao, Moori e Santos (2010), em termos práticos, a logística reversa objetiva, principalmente, a redução da poluição do meio ambiente e desperdícios de insumos

por meio da reciclagem e reutilização de produtos. Ainda conforme os autores, suas atividades podem ser resumidas em cinco funções básicas: (i) planejamento, implantação e controle do fluxo de materiais e do fluxo de informações do ponto de consumo ao ponto de origem; (ii) movimentação de produtos na cadeia produtiva, na direção do consumidor para o produtor; (iii) busca de uma melhor utilização de recursos, seja reduzindo o consumo de energia, seja diminuindo a quantidade de materiais empregada, seja reaproveitando, reutilizando ou reciclando resíduos; (iv) recuperação de valor e (v) segurança na destinação após utilização.

A partir da década de 80, a logística reversa tem se destacado junto aos meios público, acadêmico e empresarial. Com o aumento do comércio eletrônico e do varejo multicanal, aliado à necessidade de obter uma gestão eficiente da crescente quantidade de resíduos produzidos, a LR se apresenta como uma ferramenta estratégica em um contexto industrial e empresarial, tanto no Brasil quanto nos demais países. (VENTURA, 2018; SEHNEM; PEREIRA, 2019) Atuante na área da logística empresarial, a LR visa facilitar a logística de devolução dos resíduos ao ciclo produtivo ou de negócios, agregando-lhes valor econômico, ecológico e legal, através de sistemas de distribuição reversos de pós-venda e pós-consumo (LEITE, 2003; SHIBAO; MOORI; SANTOS, 2010).

No sistema de pós-venda, o produto é retornado diante da insatisfação do consumidor, pela detecção de problema no produto ou ainda com produtos em recall (quando o fabricante solicita a devolução do produto para que seja reparado ou substituído). No sistema de pós-consumo, é verificado se o produto reutilizado ainda pode ser aproveitado ou, em última hipótese, ser descartado. Entrando no processo da logística reversa, os produtos podem ter seu valor econômico recuperado através, por exemplo, da remanufatura. Por meio da remanufatura, os produtos podem ter ampliado o seu ciclo de vida, sendo reinserido para utilização em diversos contextos socioeconômicos (VENTURA, 2018).

2.4 REMANUFATURA

A remanufatura consiste em uma importante atividade industrial, fundamental para a produção sustentável, com enorme potencial para gerar impactos positivos nas áreas econômicas, ambientais e sociais. O aumento da concorrência e a imposição de leis ambientais cada vez mais rigorosas fazem com que as empresas sejam forçadas a buscarem alternativas, ao longo da cadeia de valor do produto, que sejam capazes de incrementar seus lucros. Com a crescente conscientização da sociedade em relação às questões ambientais

aliada aos potenciais benefícios econômicos, a remanufatura surge como uma importante estratégia, oferecendo a estas empresas a oportunidade de se tornarem cada mais competitivas (CORREA, 2019; RUSCHIVAL, 2012; SUNDIN; LINDAHL, 2008; IJOMAH, 2009).

O processo de remanufatura não é novo. Desde a Segunda Guerra Mundial, período de escassez de materiais que afetou diversos setores industriais, as empresas tiveram de optar por recuperar componentes e peças em vez de produzi-las (PAIVA, 2013; HATCHER; IJOMAH; WINDMILL, 2011). No entanto, o interesse em remanufatura como tema de pesquisa científica surgiu com os estudos do Professor Robert Lund (1984), que a conceituou como sendo a “recuperação de um produto usado, descartado ou avariado, às suas especificações originais, e a sua funcionalidade, por meio de um processo industrial”.

No Brasil as primeiras iniciativas deste mercado iniciaram nas indústrias de peças automotivas, com a criação da Associação Nacional dos Remanufuradores de Autopeças (ANRAP), em 1994, pelas empresas Cummins, Bosh, Sachs, TRW, Luk e Knorr Bremse, trazendo importantes conhecimentos sobre remanufatura usados nos mercados internacionais. O setor automotivo é o que mais tem experiência em remanufatura, e foi responsável por incentivar outros setores como os de eletrodomésticos, elétricos, cartuchos de toners de impressoras, telefones celulares e entre outros (RUSCHIVAL, 2012).

A remanufatura consiste em um processo de devolução de um produto usado, desgastado ou avariado para uma condição semelhante à nova, com as mesmas funções, especificações e garantias do produto novo correspondente. É a prática da desmontagem, limpeza, reparação, substituição de peças, se necessário, remontagem e teste do produto, com o intuito de atingir uma qualidade, no mínimo, equivalente a um produto novo. Os produtos usados e descartados que chegam ao processo de remanufatura são chamados “cores” ou “núcleos” (SUNDIN, 2004; HATCHER; IJOMAH; WINDMILL, 2011; HAMMOND; AMEZQUITA; BRAS, 1998; BRAS; HAMMOND, 1996; RUSCHIVAL, 2012)

A remanufatura é uma estratégia de fim de vida que recupera um produto usado atendendo as mesmas especificações que um produto novo em termos de qualidade, funcionalidade e garantia. Esta recuperação de produtos e componentes tem como propósito agregar além de valores econômicos também valores ambientais na fase de descarte dos referidos itens. A remanufatura tornou-se muito popular ao ser reconhecida como uma das estratégias mais eficazes e eficientes tanto em termos de benefícios ambientais e sociais como em termos de viabilidade econômica no que tange ao gerenciamento dos produtos em fim de vida (NAKAJIMA et al., 2019; SITCHARANGSIE; IJOMAH; WONG, 2019; MEDEIROS, 2020; KAFUKU et al, 2015; LAHROUR; BRISSAUD; ZWOLINSKI, 2019).

A prática da remanufatura não só traz benefícios econômicos, uma vez que diminui os custos para a produção, permite a geração de emprego e a venda de produtos por preços mais acessíveis que os novos, mas também ambientais, pois reduz os gastos energéticos e a disposição de resíduos, o que, nos últimos anos, tem atraído crescente atenção global. Envolve, também, um maior grau de trabalho do que as práticas de condicionamento e reparo, pois acaba exigindo a desmontagem total do produto, limpeza, restauração e renovação de seus componentes (RUSCHIVAL, 2012; MATSUMOTO et. al, 2016).

A remanufatura é a forma mais econômica e sustentável para o reuso e reciclagem de um bem manufaturado. Um produto que é projetado para o processo de remanufatura poderá ser devolvido a um estado de funcionamento capaz de suportar outro ciclo de vida completo. Em comparação com a produção convencional, um produto remanufaturado consome de 50% a 80% menos energia, e é capaz de reduzir os custos de produção em até 80%. Ainda, traz benefícios de rentabilidade e sustentabilidade, reduzindo a utilização de aterros e o uso de matérias-primas virgens (PAIVA, 2013; SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009; RUSCHIVAL, 2012).

Mesmo com as vantagens citadas anteriormente, o processo de remanufatura ainda é incipiente no Brasil, devido ao custo e à falta de informação. Outro fator que contribui para isto é a ambiguidade da sua definição, pois geralmente é confundida com outros conceitos de estratégias de fim de vida (EoL). O quadro 1 a seguir apresenta uma caracterização comparativa entre esses conceitos.

Quadro 1 - Conceitos de estratégias de fim de vida (EoL)

Estratégias	Definição
Remanufatura	Processo em que os produtos usados são trazidos às condições semelhantes a de um produto novo, com as mesma garantias.
Recondicionamento	Processo de retirada de um produto, onde todos seus componentes que falharam ou estão prestes a falhar são restaurados ou substituídos, resultando no retorno do produto a um padrão aceitável, com garantias menores.
Reparo	Processo de correção de uma determinada falha dentro do produto. Os produtos reparados não são restaurados ao padrão original e qualquer garantia emitida cobre apenas a falha corrigida.
Reciclagem	Processo em que os produtos são coletados, processados e devolvidos ao formato de matéria-prima, onde a energia é usada para criar um produto pré-reciclado. Novos produtos podem ser fabricados a partir da matéria-prima.
Reuso	Processo de reutilização de um produto para a mesma finalidade, sem a necessidade de qualquer reparo.

Fonte: Adaptado de Cutovoi (2019).

Para completar o processo de remanufatura é necessário um esforço muito maior em comparação ao que é exigido no recondicionamento ou na recuperação. Ainda, a qualidade incerta e a falta de informações do produto usado antes dele entrar no processo são obstáculos na recuperação do valor dos produtos devolvidos (RUSCHIVAL, 2012).

Sundin (2004) aponta algumas barreiras à remanufatura, sendo: (i) falta de disponibilidade de peças e custo de substituição; (ii) diversidade dos produtos; (iii) limpeza/corrosão; (iv) design e fragilidade da peça, método de fixação e meios de montagem/desmontagem e (v) mão-de-obra qualificada.

No entanto, a maioria dos autores considera a remanufatura fundamental para a produção sustentável. Esta atividade acaba por melhorar a imagem das empresas no quesito ambiental, além de gerar lucros com a venda dos produtos remanufaturados.

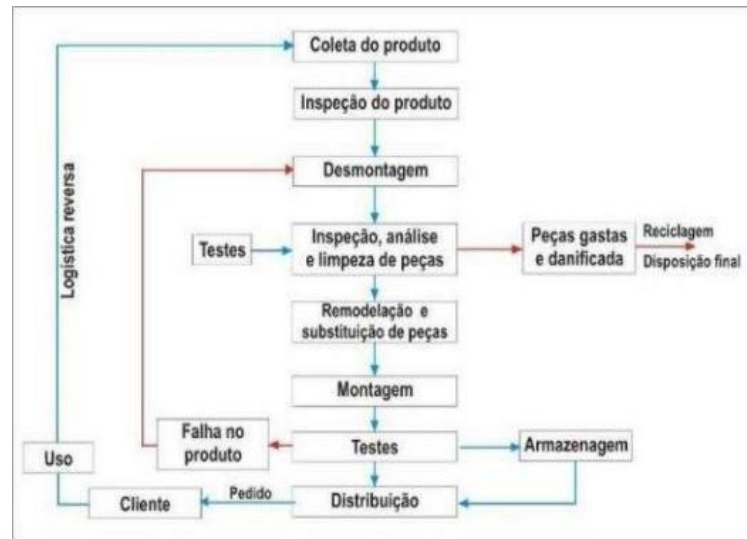
Nota-se, também, que existem diversas empresas realizando a coleta dos produtos usados para a remanufatura. As empresas Dell e IBM são organizações que deram início à atividade de recuperação via remanufatura, inclusive, com a comercialização desses produtos nos seus próprios canais de venda (HEYDARI; GOVINDAN; SADEGHI, 2018; OTIENO; LIU, 2016; MALEKI et al., 2017; NAKAJIMA et al., 2019; XIAO et al., 2017).

2.4.1 Processo de remanufatura

Com o intuito de promover cada vez mais a sustentabilidade das suas operações, as empresas estão optando por uma abordagem diferente em relação ao ciclo de vida dos seus produtos, focando na redução da extração e consumo da matéria-prima e energia. Para atingir este objetivo, tende-se a adaptar os seus produtos a fim de facilitar a sua recuperação, reutilizando-o por inteiro, ou parte dele, mais de uma vez. Ao utilizar este conceito, o fluxo dos materiais ao longo da economia ocorre em um sistema circular, diferente da linearidade que ainda domina a sociedade do consumo (SUNDIN, 2004).

Sundin (2004) descreve o processo de remanufatura em oito etapas: (i) coleta dos “núcleos”; (ii) inspeção e identificação de falhas; (iii) desmontagem do produto; (iv) limpeza e armazenamento das peças; (v) reparo ou substituição das peças avariadas, se necessário; (vi) desmontagem do produto; (vii) testes de desempenho e (viii) devolução do produto ao mercado. O autor ainda ressalta que, dependendo das características do produto entregue à remanufatura, esta ordem pode ser alterada.

Figura 3 - Etapas genéricas do processo de remanufatura



Fonte: Adaptado de Ijomah et al (2007)

O processo de remanufatura inicia na coleta e entrega do produto usado (núcleo) ao remanufaturador. As atividades de logística reversa são importantes para balancear o retorno de produtos usados com a demanda por produtos remanufaturados. Após a coleta, o núcleo é inspecionado com o intuito de identificar danos e falhas nos seus componentes. Esta fase garantirá que peças defeituosas não serão reutilizadas. Portanto, o consumidor terá confiança em adquirir o produto remanufaturado com garantias semelhantes a um novo. Depois da inspeção o produto usado é desmontado para análise dos seus componentes e verificar a possibilidade de reaproveitamento das peças. Nesta fase é crucial que se tome precauções, pois qualquer dano pode afetar significativamente o processo da remanufatura, reduzindo o tempo de vida do produto e aumentar os custos de substituição (BRAS; HAMMOND, 1996; AMEZQUITA et al, 1995; SHU; FLOWERS, 1999; GUIDE Jr., 2000; BARQUET; FORCELLINI, 2009; JAPKE, 2009; RUSCHIVAL, 2012).

As inspeções e análises das peças são realizadas durante a desmontagem dos núcleos. Este procedimento é necessário para garantir que peças danificadas não retornarão a composição do produto. Após a inspeção, é realizada a fase mais importante no processo de remanufatura: a limpeza das peças. Nela são removidas todas as substâncias que dificultariam a realização de qualquer uma das etapas da remanufatura. Caso sejam identificados falhas ou danos permanentes nas peças, ocorre a substituição das mesmas e as substituídas são encaminhadas para reciclagem, incineração ou aterros (BRAS; HAMMOND, 1996;

AMEZQUITA et al, 1995; SHU; FLOWERS, 1999; GUIDE Jr., 2000; BARQUET; FORCELLINI, 2009; JAPKE, 2009; RUSCHIVAL, 2012).

Concluídas as inspeções, passam-se as fases da remodelação e testes iniciais. Na remodelação, é realizada a reparação e reconstituição das peças avariadas utilizando o processo da usinagem e outros meios de recuperação, podendo ainda inserir novos componentes no produto. Ainda, o produto pode ter novas funções que não foram previstas no seu primeiro ciclo de vida. Todos os componentes do produto devem executar determinadas funções, por isso os testes são essenciais para garantir o funcionamento das peças. Do contrário, devem ser substituídas por novas (BRAS; HAMMOND, 1996; AMEZQUITA et al, 1995; SHU; FLOWERS, 1999; GUIDE Jr., 2000; BARQUET; FORCELLINI, 2009; JAPKE, 2009; RUSCHIVAL, 2012).

O produto é remontado e encaminhado para uma série de testes, a fim de verificar o seu funcionamento. Se durante os testes ainda forem observadas falhas, o produto retorna ao estágio inicial do processo. Cumprida estas etapas, o produto remanufaturado é encaminhado para armazenagem ou para distribuição, conforme for a necessidade do cliente (IJOMAH et al, 2007; SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009).

Quanto maior o número de peças reutilizadas em um produto remanufaturado, mais rentável torna-se o processo de remanufatura, especialmente se estas peças forem onerosas demais para substituição. Utilizar um material de alta densidade também tem impacto positivo, pois aumenta a durabilidade e o potencial de uma peça suportar os esforços de todos os processos da remanufatura (IJOMAH et al, 2007; SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009). Lund (1984) afirma que produtos remanufaturados podem ser devolvidos ao mercado com preços competitivos, já que uma fração considerável de materiais é recuperada.

2.4.2 Características de um produto remanufaturável

Para Lund (1984), um produto remanufaturável necessita apresentar as seguintes características: (i) ser um bem durável; (ii) ser descartável; (iii) ser passível de desmontagem, em todos os seus níveis; (iv) conter um alto valor agregado, ainda que no fim da vida útil; (v) ter custo de retorno menor em comparação ao valor agregado; (vi) não ser alvo de rápidas mudanças na sua tecnologia, visto que mudanças constantes dificultam o processo e (vii) o consumidor ter consciência da existência de produtos remanufaturados.

Produtos com potencial apropriado para remanufatura são aqueles considerados maduros, comuns em diversos países e que não são afetados pela moda. Afirmam também que

a idade, a marca e modelo do produto são bem menos importantes do que a sua funcionalidade. Ainda, é essencial que as peças mantenham suas condições de uso e conformidade, para que possam ser reutilizadas sem comprometer a durabilidade do produto final (SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009).

Ainda que, se no produto houver uma parte que possua um desenvolvimento de tecnologia mais rápido, seria necessário que o mesmo fosse estruturado de forma a facilitar a sua substituição. Assim, o produto seria passível de remanufatura com maior facilidade. Para tanto, o design pode ser utilizado para assegurar a reutilização de componentes, principalmente se for aplicado nas fases iniciais do projeto, pois é no decorrer do ciclo de vida do produto que se define os benefícios que podem ser obtidos com as suas ferramentas e atribuir grande parte dos custos associados aos produtos (SUNDIN; BJORKMAN; JACOBOSON, 2000; RUSCHIVAL, 2012).

2.4.3 Benefícios da remanufatura

Prolongar a vida de um produto através da remanufatura é a chave para estender os recursos naturais da terra, e diminuir o impacto ambiental das indústrias de manufatura. O uso racional de materiais e de energia se tornam importantes diretrizes, perante aos riscos de esgotamento dos recursos naturais. A remanufatura oferece uma vasta variedade de ganhos para a sociedade, combinando benefícios de rentabilidade e sustentabilidade, diminuindo a quantidade de matéria-prima e energia utilizada na produção tradicional e, reduzindo a utilização de aterros (PAIVA, 2013; LUND, 1984).

Do ponto de vista social, a remanufatura é relevante no que diz respeito ao potencial de geração de empregos, visto que se trata de um processo bastante intenso em mão de obra se comparado a outras estratégias de recuperação. Acaba por ter uma contribuição significativa em comunidades onde o desemprego é alto, empregando muitas pessoas com menor habilidade ou qualificação, principalmente na área de produção, mesmo nas etapas onde máquinas auxiliam nas atividades (CORREA, 2019; PAIVA, 2013).

As atividades de remanufatura melhoram a imagem ambiental das empresas, além de gerar lucros com a venda de produtos remanufaturados. O investimento de capital necessário para a remanufatura é relativamente baixo, por dois motivos: a matéria prima principal é um produto usado descartado (núcleos), e o processo utiliza basicamente ferramentas manuais, de baixo custo, em detrimento aos equipamentos utilizados na fabricação de peças, geralmente de custo elevado (PAIVA, 2013).

O consumo de energia resultante de atividades de remanufatura é consideravelmente inferior em comparação com a produção de um produto completamente novo. Estima-se que um produto remanufaturado necessita de 50% a 80% menos energia do que um produto equivalente fabricado a partir de matérias-primas virgens. Um refrigerador novo, por exemplo, requer 50 vezes mais energia para a sua produção do que a remanufatura de tal produto (LINDAHL; SUNDIN; ÖSTLIN, 2006; PAIVA, 2013; SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009).

Com a remanufatura é possível obter bons níveis de rentabilidade, devido a grande diferença entre o valor de mercado de um produto descartado e o seu valor econômico para o remanufaturador. Segundo o autor, o preço de um produto remanufaturado equivale de 45% a 65% do preço de um produto novo equivalente. Ainda, os custos de produção podem ter uma redução de 20% a 80% em comparação à fabricação convencional (SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009; LUND, 1984).

A remanufatura promove a revitalização de produtos usados para que estes voltem a ter a mesma qualidade e garantias de produtos novos, a preços mais acessíveis. Também gera oportunidades de trabalho e de empregos às pessoas menos qualificadas, e possibilita abertura de novos mercados. Cooperativas de coleta, serviços especializados em logística reversa, inspeção e desmontagem dos núcleos são alguns dos mercados que podem ser criados com as atividades da remanufatura (PAIVA, 2013).

2.4.4 Barreiras para remanufatura

A implementação do processo de remanufatura apresenta uma série de questões que impactam no êxito das atividades, que devem ser observadas e tratadas com o intuito de fomentar o sucesso da operação de remanufatura.

Uma das dificuldades enfrentadas está na obtenção dos núcleos em condições adequadas para a remanufatura. Grande parte destes núcleos que chegam para remanufatura é de origem desconhecida, o que dificulta a obtenção de um produto final de qualidade equivalente à de um produto novo. Para o autor, este é o maior teste de habilidade exigido de um processo de remanufatura (ÖSTLIN; SUNDIN; BJÖRKMAN, 2009; LUND, 1984).

Outro obstáculo está relacionado com o design dos produtos. Comumente, o produto não é constituído de forma a facilitar a sua desmontagem, pois os projetos focam na sua funcionalidade e nos custos de produção. As questões ambientais também são negligenciadas na fase de concepção do produto. Ainda, a falta de conhecimento faz com que a reciclagem

seja o destino dos produtos avariados, apesar de a remanufatura proporcionar maiores benefícios ambientais e financeiros (CORREA, 2019; PAIVA, 2013; SUNDIN; LINDAHL; IJOMAH, 2009).

2.5 RESÍDUO ELETRÔNICO

Os produtos eletrônicos são confeccionados para trazer comodidade e conforto para seus usuários. O expressivo uso de equipamentos e a constante evolução tecnológica, motivados pelo alto consumo imposto a sociedade e pela obsolescência programada, geram um montante de resíduos praticamente imensuráveis, gerando consequências tanto em aspectos ambientais, como econômicos e sociais (SALES et al, 2017; SILVA, 2013).

O gerenciamento do resíduo eletrônico (*e-waste*) é um dos problemas relacionados à poluição que crescem rapidamente em todo o mundo. Concomitantemente ao potencial nocivo esses resíduos também oferecem oportunidades de inovação e criação de novos produtos, minimizando, assim, o impacto no meio ambiente. Com a reutilização e reciclagem dos *e-waste* é possível gerar ganhos financeiros, já que gastos com produção de novos dispositivos eletrônicos apresentam alto custo. Ainda, evita-se que materiais tóxicos sejam lançados no meio ambiente (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

Resíduo eletrônico é constituído por aparelhos eletrodomésticos e por equipamentos e componentes eletroeletrônicos de uso doméstico, industrial, comercial ou no setor de serviços que estejam em desuso e sujeitos à disposição final, tais como: componentes e periféricos de computadores; monitores e televisores; acumuladores de energia (baterias e pilhas); e produtos magnetizados (BRASIL, 2010).

A preocupação com o descarte desses componentes se dá em virtude do potencial tóxico de muitos desses dispositivos. Entre as substâncias presentes nos resíduos eletrônicos consideradas mais problemáticas do ponto de vista ambiental e da saúde humana são os metais pesados, gases de efeito estufa, como os CFC (clorofluorcarbonetos), as substâncias halogenadas, bifenilaspolicloradas, bromatos e ainda o arsênio (RODRIGUES, 2007).

Os aparelhos eletrônicos, de modo geral, apresentam substâncias tóxicas no seu processo de industrialização, como as apresentadas no quadro 2, entre os quais destaca-se:

Quadro 2 - Substâncias encontradas nos dispositivos eletrônicos

Componente	Dispositivos
Mercúrio	Computadores, Monitores e TV de plasma.
Cádmio	Computadores, monitores de tubo e baterias de laptops.
Arsênio	Celulares
Berílio	Celulares
Retardantes de chamas	Usados para prevenir incêndios em diversos eletrônicos
Chumbo	Computador, celular e televisão.
Bário	Lâmpadas fluorescentes e tubos.
PVC	Usado em fios para isolar correntes

Fonte: Adaptado de Ferreira e Ferreira (2008).

No processo de descarte incorreto do resíduo eletrônico, emissões de diferentes substâncias são lançadas ao meio ambiente, afetando diretamente a sociedade. Uma das consequências deste ato é a contaminação do solo, esgotos e até o lençol freático, poluindo tanto a água potável como a água de irrigação de plantações e conseqüentemente os alimentos cultivados nesse solo. O aumento da poluição do meio ambiente vem criando importantes iniciativas na reutilização dos materiais e conseqüentemente a formação de um ciclo que parte do consumidor e chega novamente no fornecedor (GUEDES; OLIVEIRA; LIMA, 2010; LEITE; LAVEZ; SOUZA, 2009).

O descarte dos equipamentos eletrônicos obsoletos representa um desperdício de recursos já que existem metais preciosos nestes resíduos. Nesse sentido, a logística reversa e a remanufatura dos componentes destacam-se como opções mais apropriadas.

2.5.1 Cartuchos de toners

Os resíduos eletrônicos são um potencial desastre ambiental se incorretamente descartados na natureza e não reaproveitados. Dentre os materiais eletroeletrônicos mais consumidos encontram-se os cartuchos de tinta e toners de impressoras. O cartucho de toner é um dispositivo utilizado em impressoras a laser. Diferente do cartucho de tinta, que possui em seu interior a tinta em estado líquido, o cartucho de toner a possui em estado sólido, mais precisamente, em pó. No momento da impressão, parte deste pó é jogado na folha fixando-se e partindo para o fusor, que tem a função de elevar a temperatura do pó até que este mude para o estado líquido e assim permanecendo na folha. Trata-se de uma tecnologia recente se comparada aos cartuchos de tinta (CIROTTI; LÍBANO, 2013).

Seu uso é baseado em diferentes impressões, de fotos a documentos. A maior parte destes cartuchos podem ser recarregados ou remanufaturados. A recarga consiste em

preencher novamente o cartucho de tinta ou pó de toner sem nenhum controle de qualidade de seus componentes, enquanto um cartucho remanufaturado é aquele que passou por um processo que inclui teste de seus circuitos eletrônicos, troca de peças, recarga e controle de qualidade de impressão (CIROTTI; LÍBANO, 2013).

O cartucho de toner é um dispositivo armazenador, carregado em suas cores primárias. O pó de toner é colorido e é voltado para impressoras do tipo laser. O pó é aquecido e transfere, através de cilindros, a imagem que será gravada no papel. Já o cartucho de impressora consiste num recipiente para tinta líquida (HUANG; SARTORI, 2012; CIROTTI; LÍBANO, 2013).

O cartucho de toner é composto de carbono com estireno acrilato, resina de poliéster ou alguns outros polímeros especiais, que funciona como tinta para as impressoras a laser. O pó contido nos cartuchos de toners pode causar diversos problemas de saúde, principalmente no sistema respiratório. Esses problemas são originados pelo tamanho extremamente reduzido das partículas presentes no pó do toner.

Para Huang e Sartoti (2012) é importante destacar que

“Apesar de o pó de toner não ser considerado tóxico em alguns países, o contato direto com o produto pode causar irritações respiratórias e cutâneas. Os toners devem ser armazenados no invólucro aluminizado original ou clipe de proteção, longe de umidade, temperaturas elevadas e livre de quedas, a fim de evitar rachaduras nos cartuchos e possível vazamento de pó. Inicialmente, o grupo verificou na FEEC um mau armazenamento de cartuchos utilizados, empilhados no segundo andar, próximo ao laboratório de informática da faculdade (SIFEEC)”.

Estes equipamentos possuem metais potencialmente tóxicos e materiais que demoram séculos para se desintegrar no meio ambiente. Com isso, o descarte incorreto degrada o meio ambiente causando riscos à saúde dos rios e dos solos, da flora e da fauna, e conseqüentemente, à saúde humana (CIROTTI; LIBANO, 2013).

Para Trevisan et al (2016) os cartuchos de toners possuem componentes químicos como: (i) pigmentos, que possuem em sua composição negro de fumo, responsável pela coloração negra apresentada pela tinta; (ii) resinas, que são compostos orgânicos derivados do petróleo, tendo inúmeras possibilidades de utilização, como em cordas de violino para uma melhor fricção com o arco e em joias devido sua resistência e transparência e a possibilidade de diversas formas; (iii) ceras, que podem ser utilizados como isolantes térmicos, e nas indústrias são aplicadas à produção de vernizes, medicamentos e outros; (iv) óxido de ferro, utilizado em sua maioria como matéria prima pelas indústrias de aço e ferro e a (v) sílica, matéria prima básica para a produção de vidro, que dependendo da mistura, produz-se vidros

comuns ou de alta resistência. Em uma de suas formas cristalinas, possui propriedades piezelétricas, e por isso, muito empregadas em componentes eletrônicos.

O cartucho de toner normalmente não é considerado na problemática do descarte do resíduo eletrônico, sendo descartado sem um estudo sobre a possibilidade de ser reaproveitado. Trata-se de uma peça essencial para uma impressora, que também é largamente descartada na natureza. Após o fim de sua vida útil, um cartucho de toner pode ser recarregado até três vezes antes que suas peças sejam desgastadas. Então, após esse ciclo, é possível ainda ser remanufaturado para estender seu ciclo de vida (SUNDIN; DUNBACK, 2013).

2.6 DINÂMICA DE SISTEMAS

Os sistemas podem ser classificados como “abertos” ou “fechados”. Sistemas fechados também são chamados de sistemas com *feedback*. Sistemas abertos são aqueles que possuem a característica de que as saídas respondem às entradas, porém estão dissociadas destas últimas e não têm sobre elas nenhuma influência. Um sistema aberto não tem consciência do seu próprio desempenho, e uma ação passada não controla uma ação futura. Por exemplo, um automóvel em si é um sistema aberto, pois ele não é governado por onde ele esteve no passado e também não tem um objetivo para estar no futuro (FORRESTER, 1968).

Sistemas fechados, também chamados *feedback systems*, são aqueles cujo comportamento presente é influenciado de alguma forma pelo seu comportamento passado. Assim, por exemplo, o sistema composto por um motorista e seu automóvel possui o objetivo de trafegar por uma rodovia a uma velocidade pré-determinada legalmente por um órgão de trânsito. O comportamento presente de acelerar ou desacelerar desse sistema depende do seu estado anterior, cuja velocidade pode ter ultrapassado ou não o limite permitido pela legislação naquela rodovia (COLOMBO, 2003).

Sterman (2000) define a Dinâmica de Sistema (DS) como um campo que possui o objetivo de mapear estruturas de sistemas organizacionais ou sociais e verificar a inter-relação de seus elementos num contexto amplo, em que cada parte contribui para um processo comum. Assim, através da simulação por dinâmica de sistemas, pode-se compreender como um determinado sistema se comporta ao longo do tempo e como possíveis mudanças em seus elementos afetam todo o seu comportamento.

Outra definição sobre a DS é citada por Encalada et al (2017), ao comentar como Jay W. Forrester, ao criar esta técnica no início da década de 1960, desenvolveu uma teoria para

simular sistemas complexos não lineares que contenham *feedbacks*. Assim, as pesquisas pertinentes vêm contemplando esta literatura com contribuições significativas relacionadas à formação de um corpo teórico/metodológico bem fundamentado, denso e aplicável às corporações e suas circunstâncias.

O uso da dinâmica de sistemas possibilita a construção de um modelo da realidade, onde seus elementos e suas relações de causa e efeito podem ser visualizados por diagramas e gráficos através da simulação computacional. Isso torna possível a experimentação de alternativas e mudanças no comportamento dos elementos de um sistema e a definição de cenários que podem resultar em diferentes comportamentos de um mesmo sistema (WALTERS, et al., 2016).

Colombo (2003) explica como os sistemas podem ser complexos, representados por modelos com milhares ou mesmo milhões de variáveis, que com seu grau de detalhamento e complexidade possuem enormes quantidades de ciclos de *feedback*, que se auto influenciam e definem um comportamento dinâmico

A dinâmica de sistemas utiliza dois tipos de diagramas que podem ser simulados por computador e que são compostos por enlaces de *feedback* que se interagem: o diagrama de laço causal (modelagem “*soft*”) e o diagrama de estoque e fluxo (modelagem “*hard*”). A modelagem *soft* representa a análise qualitativa, e é vista como problemática e pluralista, requerendo uma negociação para obter progresso pela aprendizagem. A modelagem *hard* é responsável pela análise quantitativa, como por exemplo, as equações matemáticas que definirão as relações entre os componentes do modelo. É vista como direta, unitária, assumida tacitamente, possível de trazer uma representação do mundo real, de um produto ou de uma recomendação (STERMAN, 2000).

A seguir serão especificadas as duas abordagens.

2.6.1 Diagrama de laço causal

Os diagramas de laço causal representam as relações de causa e efeito entre as variáveis ou elementos de um determinado sistema complexo e permitem que as estruturas de retroalimentação (*feedback*) sejam visualizadas. Talvez o primeiro passo ao se utilizar a DS seja entender os enlaces das retroalimentações que fazem parte do sistema complexo em estudo (PIDD, 1998).

O diagrama de laço causal permite uma visão sistêmica da estrutura causal do sistema complexo cuja utilização ocorre nas seguintes situações: na conceitualização de problemas; no

desenvolvimento de modelos de fluxo e estoque; na análise qualitativa e explicação de resultados de simulações; e em projetos de novas políticas (CARDOZO, 2000).

O diagrama de laço causal possui início e fim na mesma variável, o que constitui uma sequência de relações circulares. Ou seja, todas as variáveis são ao mesmo tempo causa de um evento e efeito de outro. Um sistema complexo representa uma sucessão de eventos de causa e efeito e de diversos ciclos de retroalimentação. Os diagramas de laços causais são a base para a construção de diagramas de fluxo e estoque na área de dinâmica de sistemas (MARTIN, 2001).

Um laço causal é caracterizado por sua polaridade. Um número par de relações negativas caracteriza um laço de *feedback* positivo, enquanto um número ímpar de relações negativas um *feedback* negativo. A representação da causa e efeito é realizada por setas ou flechas no diagrama causal que são acompanhadas de sinais positivos (+) ou negativos (-), que indicam o tipo de influência de uma variável sobre a outra. O sinal (+) indica que uma mudança na variável de origem da flecha produz uma mudança no mesmo sentido na variável destino. Já o sinal (-) indica um efeito da variável destino contrário à mudança da variável de origem da seta (STERMAN, 2000).

Os processos de *feedback*, presentes em sistemas complexos, encontram-se em várias situações ao nosso redor. A expansão da população mundial, o crescimento de *startups*, as quedas abruptas na bolsa de valores e a proliferação de micróbios em nossos organismos são exemplos de *feedbacks* positivos (STERMAN, 2000).

Com a dinâmica de sistemas é possível simular, também, o impacto do tempo e dos atrasos (*delays*) no comportamento de um sistema complexo. Esses *delays* são encontrados em situações nas quais os efeitos não ocorrem imediatamente, mas sim posteriormente em outro momento que pode ser medido, por exemplo, em horas, meses ou em vários anos (GARCIA, 2006).

2.6.2 Diagrama de fluxo e estoque

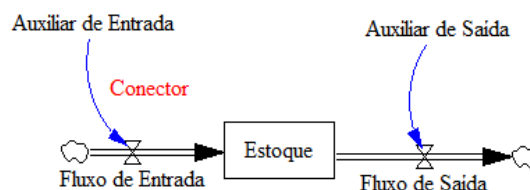
O principal objetivo dos diagramas de fluxo e estoque é representar os relacionamentos quantitativos (matemáticos) entre as variáveis de estoque (acumulações) e as variáveis de fluxo (taxas) que formam um modelo dinâmico de um sistema complexo, enfatizando a estrutura física do sistema analisado (PIDD, 1998).

Os principais elementos necessários para a construção dos diagramas de fluxo e estoque são os níveis (estoques) e as taxas (fluxos), além das variáveis auxiliares e os

conectores. No diagrama de laço causal foi visto que os laços de realimentação ou *feedback* são os blocos principais para a compreensão de um determinado sistema complexo. Já no diagrama de fluxo e estoque, os níveis e os fluxos são importantes, pois constituem os blocos que formam esses laços de realimentação (MUSSE, 2010).

Na Figura 4 é apresentada a notação proposta por Sterman (2000) para os diagramas de fluxo e estoque.

Figura 4 - Componentes da dinâmica de sistemas



Fonte: adaptada de Rodrigues (2017)

Os estoques, também chamadas de variáveis de níveis, são responsáveis por armazenar o estado da simulação, e também possuem a função de armazenar ou acumular outros elementos do sistema. Sua principal importância na simulação é fornecer uma visão do sistema em qualquer instante de tempo. Mudanças nos estoques não são instantâneas, demandam certo tempo e ocorrem devido à ação dos fluxos. Por sua vez, os fluxos, são variáveis de ação, podendo aumentar ou diminuir o volume determinado no estoque. A alteração dos fluxos é capaz de gerar crescimento ou redução dos valores armazenados nos estoques (RODRIGUES, 2017).

As variáveis auxiliares são componentes para a realização de operações algébricas, que processam informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externas ao sistema. Possuem função de *links* de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e auxiliares. Por fim, existem os conectores que são os que representam as inter-relações entre todos os componentes, ou seja, são essas interligações que ligam os componentes que formam a expressão matemática (DEATON; WINEBRAKE, 1999; BLOIS; SOUZA, 2008).

3 MÉTODO DE PESQUISA

As pesquisas em administração possuem diversos desafios, sendo um deles a compreensão das práticas de gestão e produção de forma situada. É necessário que estas pesquisas abordem temas de real relevância, e que gerem resultados não apenas para a comunidade acadêmica, mas também para os profissionais da área (LACERDA et al, 2013).

Para essa pesquisa será utilizado a metodologia de modelagem computacional, baseado na teoria de Stermann (2000). Segundo o autor, todo modelo é uma representação de um sistema real, que operacionalizam como um grupo de elementos que funcionam inter-relacionados. Para dinamizar o modelo será utilizada também a metodologia de dinâmica de sistemas. O resultado final atingido nesta pesquisa foi um modelo que serviu de referência para a compreensão da remanufatura de impressoras e de cartuchos de toners. A partir do modelo construído, foi possível explorá-lo para entender sua estrutura e comportamento, realizando testes mediante várias condições para comparar diferentes cenários.

A utilidade dos modelos é solucionar problemas específicos e simplificar sistemas, além de testar processos e cenários. Nesse sentido, a dinâmica de sistemas é uma técnica apropriada para modelar e simular processos, pois ela permite levar em consideração as variações dinâmicas envolvidas nos processos modelados. Os modelos de dinâmica de sistemas buscam caracterizar o problema dinamicamente, ou seja, verificar como um padrão de comportamento se desenvolve ao longo do tempo, e conseqüentemente como o problema surgiu e como poderá evoluir no futuro. Para isso, devem-se desenvolver modelos de referência e um conjunto de dados descritivos que mostrem e comprovem o desenvolvimento do problema ao longo do tempo (MUSSE, 2010).

Os modos de referência têm como objetivo ajudar a romper visão de mundo orientada a eventos de curto prazo. Para isso, deve-se identificar o horizonte de tempo e definir as variáveis e conceitos considerados importantes para entender o problema e projetar políticas para resolvê-lo. O horizonte de tempo deve se estender o suficiente para trás na história para mostrar como o problema surgiu e descrever seus comportamentos. O futuro do horizonte de tempo será estendido conforme a decisão a ser tomada. Mas deve-se estender o suficiente para verificar os efeitos diretos e indiretos de possíveis políticas. A escolha do horizonte temporal influencia drasticamente sua percepção do problema, pois o horizonte temporal muda completamente a avaliação do problema (ANDRADE et al, 2006).

Outras características das pesquisas foram definidas pela abordagem de Andrade et al (2006), na qual o autor descreve a modelagem computacional como uma soma entre o

trabalho qualitativo (mapa sistêmico) que tem por objetivo analisar e capturar os dados, e um modelo quantitativo, no caso o modelo computacional, que necessita de técnicas do campo da Dinâmica de Sistemas para sua execução. Como abordado no capítulo 4 deste trabalho, a modelagem em Dinâmica de Sistemas consiste em representar os processos de um sistema. Para seu desenvolvimento, é necessário reconhecer os fluxos que convertem recursos em diferentes estados, o que implica conhecer o seu mapa sistêmico desenvolvido. A seguir serão expostos mais detalhes da metodologia do estudo.

3.1 TIPO DE PESQUISA

Esta pesquisa se caracteriza em uma investigação de natureza exploratória, de abordagem quantitativa, que tem como objetivo desenvolver e avaliar modelos de dinâmica de sistemas e propor cenários para apoio ao processo decisório envolvendo o impacto ambiental e financeiro na remanufatura de impressoras e de cartuchos de toner. Segundo Gil (2010), a pesquisa exploratória tem por finalidade ampliar o conhecimento a respeito de determinado fenômeno explorando uma determinada realidade. Para atingir o objetivo proposto pela pesquisa, utiliza-se estudo de Dinâmica de Sistemas, definido por Ford (1999) como uma combinação de estoques e fluxos que utilizam uma estrutura computacional para serem simulados.

Utilizou-se a abordagem de Andrade et al (2006), na qual o autor descreve a modelagem computacional como uma soma entre o trabalho qualitativo (mapa sistêmico) que tem por objetivo analisar e capturar os dados, e um modelo quantitativo, no caso o modelo computacional, que necessita de técnicas do campo da Dinâmica de Sistemas para sua execução. A modelagem em Dinâmica de Sistemas consiste em representar os processos de um sistema. Para seu desenvolvimento, é necessário reconhecer os fluxos que convertem recursos em diferentes estados, o que implica conhecer o seu mapa sistêmico desenvolvido.

3.2 ETAPAS DO PROCESSO DE MODELAGEM

O processo de modelagem é utilizado para aplicar as ferramentas úteis para resolver problemas. Para inicializar o processo deve-se descobrir o principal objetivo para a aplicação do modelo. A seguir serão apresentadas as etapas do processo de modelagem.

3.2.1 Entendimento do problema

Esta etapa é o início do processo de modelagem, onde o modelador deve selecionar o tema e a abordagem central, indicando o problema a ser solucionado. Com isso, levantam-se as variáveis-chaves que formarão o modelo a ser simulado e analisado. Nesta etapa deverá ser pré-estabelecido o horizonte de tempo a ser simulado. Não apenas o tempo futuro para analisar, mas sim o tempo passado máximo a ser utilizado para analisar o comportamento dos dados utilizados nos estudos.

Para esse estudo a problemática utilizada foi: qual o impacto ambiental e financeiro da utilização de produtos remanufaturados a partir das impressoras e dos cartuchos de toners descartados? A variável central será entorno das impressoras e dos cartuchos de toners remanufaturados. O horizonte de tempo a ser analisado será de dez anos, tanto futuro como passado.

3.2.2 Formulação de hipóteses dinâmicas

A hipótese dinâmica tem por objetivo trabalhar a teoria do problema, possibilitando analisar o comportamento deste e observar quais as variáveis fazem parte do sistema (SILVA, 2006). A hipótese é considerada dinâmica, pois fornece uma explicação da dinâmica que caracteriza o problema em termos de *feedback* subjacente e estrutura de estoque e fluxo do sistema. Trata-se de uma hipótese que é sempre provisória, sujeita a revisão ou abandono à medida que se compara o processo de modelagem com o mundo real.

O objetivo dessa etapa é formular uma hipótese que explique a dinâmica como consequência da estrutura interna do sistema por meio da interação entre as variáveis e os agentes representados no modelo, incluindo regras de decisão.

Neste trabalho, incorporaram-se as seguintes variáveis básicas: estimativa do número de impressoras pessoais, quantidade de cartuchos de toners, descarte para remanufatura, descarte para resíduo eletrônico, impressoras remanufaturadas, cartuchos de toners remanufaturados, produtos gerados, benefícios econômicos e redução da emissão de CO₂ com o processo de remanufatura.

3.2.3 Desenvolvimento do modelo

Na terceira etapa foram especificadas as estruturas e suas regras de decisões. Ainda, foram estimados os parâmetros, relacionamentos comportamentais e as condições iniciais de simulação, bem como foram executados pré-testes para calibragem do modelo computacional final.

3.2.4 Experimento teste

Com o modelo pré-desenvolvido, foram executados diferentes testes, que analisara se o modelo reproduz adequadamente o comportamento do propósito do estudo. Foi testada também a robustez do modelo, avaliando o desempenho de maneira realista. As incertezas também foram testadas, a partir da inserção de cenários com comportamento de futuros incertos. O modelo também foi avaliado e o seu limite e sua agregação foram descobertos.

3.2.5 Avaliação final

Finalizado o modelo, foram gerados os cenários finais para a execução do mesmo. As condições que limitam as variáveis foram executadas nesta etapa. As estratégias e estruturas de decisão se mostraram aptas para testagem no mundo real. É importante ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, sendo toda e qualquer análise do tipo “*what-if*” de simples e fácil utilização, visto que qualquer modificação nos valores das taxas e variáveis geram novos resultados para análise dos usuários.

3.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para a coleta dos dados primários, a pesquisa contou com o auxílio de empresas que trabalham com a remanufatura de impressoras e de cartucho de toners. As empresas contribuíram com as informações necessárias para a construção do modelo. Os dados secundários foram coletados através de três bases: Catálogo de dissertações e teses da CAPES, *explorer IEEE* e *Web of Science*.

Para realizar a análise dos resultados da simulação computacional, foi utilizado o *software VENSIM PLE*[®]. Este software possui características de melhorar os sistemas reais, sendo muito utilizado para desenvolver e analisar modelos de dinâmica de sistemas. Através

das ferramentas e suas extensões, apresenta para o usuário uma análise de alta qualidade, com dimensões que absorvem e checam a realidade.

Nele pode-se interligar diferentes variáveis, atribuindo diferentes pesos além de fornecer ao usuário um ambiente para criação de modelos flexíveis. Outro benefício do software é ser gratuito, podendo ser utilizado em salas de aula ou em outros ambientes educacionais.

A empresa Ventana System desenvolveu o software VENSIM PLE[®] e o comercializa gratuitamente em seu sítio desde que seja utilizado para fins acadêmicos. Este software possui uma linguagem própria que se diferencia de outros na sua linguagem computacional relativamente simples. O software ainda utiliza de modo simples as mesmas nomenclaturas descritas anteriormente neste trabalho sobre os diagramas causais e de fluxo e estoque, o que facilita a construção dos modelos computacionais em dinâmica de sistemas (GONÇALVES, 2009).

Para executar o modelo dentro do software VENSIM PLE[®] é necessária a descrição matemática somente pelas variáveis de fluxo e estoque. As variáveis auxiliares ou constantes são utilizadas em situações nas quais as descrições matemáticas, elaboradas apenas pelos estoques e fluxo, se tornam grandes ou mais complexas (VENSIM, 2016).

4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Nas seções seguintes será apresentado o desenvolvimento dos modelos de remanufatura e da dinâmica de sistemas.

4.1 MODELOS DE REMANUFATURA

O aumento da geração de resíduos e do consumo de energia elétrica no mundo mostra a necessidade de soluções voltadas tanto para os aspectos ambientais quanto econômicos. Desenvolvedores de produtos empregam algumas estratégias principais para lidar com esse problema: uso eficiente de materiais na produção de bens de consumo e a utilização de processos como remanufatura ou reciclagem. A remanufatura se destaca por incluir o uso de processos industriais no prolongamento da vida útil de bens desgastados que não podem mais desempenhar sua função original (SWAANS et al, 2014; GUIDE Jr., 2000).

O processo de remanufatura envolve itens que se desgastaram ao longo do seu ciclo de vida, e os devolve ao mercado com qualidade igual ou superior a itens novos com a mesma garantia. Os benefícios deste processo não são somente econômicos, se estendendo ao meio ambiente, onde o consumo materiais e de eletricidade são reduzidos à metade, em relação aos processos convencionais (LAHROUR; BRISSAUD; ZWOLINSKI, 2019).

Weï et al (2015) observaram que mais da metade dos produtos remanufaturados custam em torno de 40% a 80% menos que produtos novos. A remanufatura pode melhorar o processo produtivo, reduzindo o impacto ambiental e o custo de produção das mercadorias, pois bens remanufaturados são mais baratos do que bens recém-fabricados, e o produto pode reduzir gastos com materiais e consumo de eletricidade. Outro benefício importante para as empresas é a valorização da marca e, conseqüentemente, o aumento de suas vendas (JUN et al., 2019; WEI et al., 2015).

Entretanto, é necessário um design de produto visando facilitar sua remanufatura. O design inadequado pode impossibilitar sua remanufatura e, por isso, recomenda-se que as empresas responsáveis pelo processo de manufatura primária fabriquem seus produtos já visando sua remanufatura. Para isto, também é necessário uma tecnologia que facilite e auxilie este processo (KRYSTOFIK et al, 2018; JENSEN et al., 2019; WEI et al., 2015).

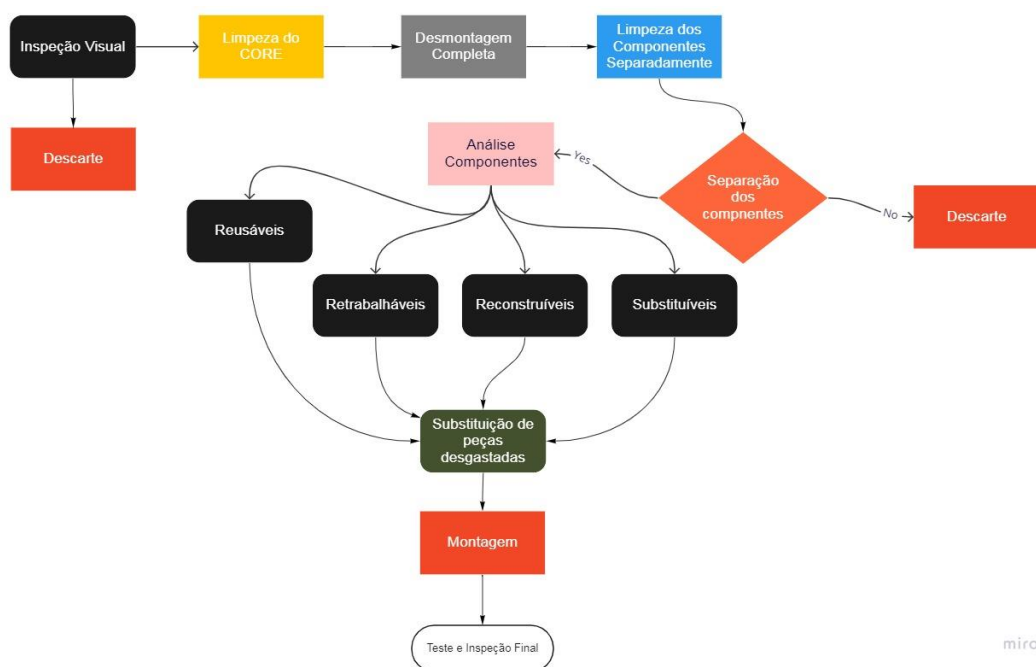
Em vista dessa lógica de escassez de recursos, a extensão da vida útil de um produto contribui na transição para uma economia circular, modificando o foco da redução de custos para a criação de valor. Ademais, estender a vida útil do produto por opções de recuperação

destes produtos pode ajudar a empresa a atingir metas de sustentabilidade (GOLINSKA; KLUEBLER, 2014; COOPER; GUTOWSKI, 2017; GOVINDAN; FATTAHI; KEYVANSHOKOOH, 2017; KLEINDORFER; SINGHAL; VAN WASSENHOVE, 2005; SCHENKEL et al., 2015).

Os processos de remanufatura podem considerar apenas produtos de remanufatura ou, simultaneamente, produtos novos e de remanufatura. Isto reforça que diferentes estratégias de operações de remanufatura são necessárias dependendo da complexidade do produto, do processo de produção, da estabilidade (volume, tempo, qualidade), do produto retornado e do suprimento do núcleo (GUIDE Jr., 2000; GOVINDAN; POPIUC, 2014; MITRA; WEBSTER, 2007; OVCHINNIKOV, 2011; GUIDE Jr.; JAYARAMAN; LINTON, 2003).

Nesta pesquisa foram utilizadas as impressoras que utilizam cartuchos de toner como objeto de estudo, além dos próprios cartuchos. Para inserir no modelo as etapas de remanufatura de uma impressora foi utilizado o fluxograma exposto na Figura 5. O fluxograma foi baseado nos autores Hilsdorf et al (2019) e Rezende (2019). Inicialmente o produto é desmontado e os seus componentes internos são inspecionados e analisados. Dependendo do estado conservação as peças são reusadas, retrabalhadas ou reconstruídas, passando para produção do produto com as peças remanufaturadas. As peças reprovadas nas análises são descartadas e substituídas por novas originais.

Figura 5 - Fluxograma da remanufatura da impressora

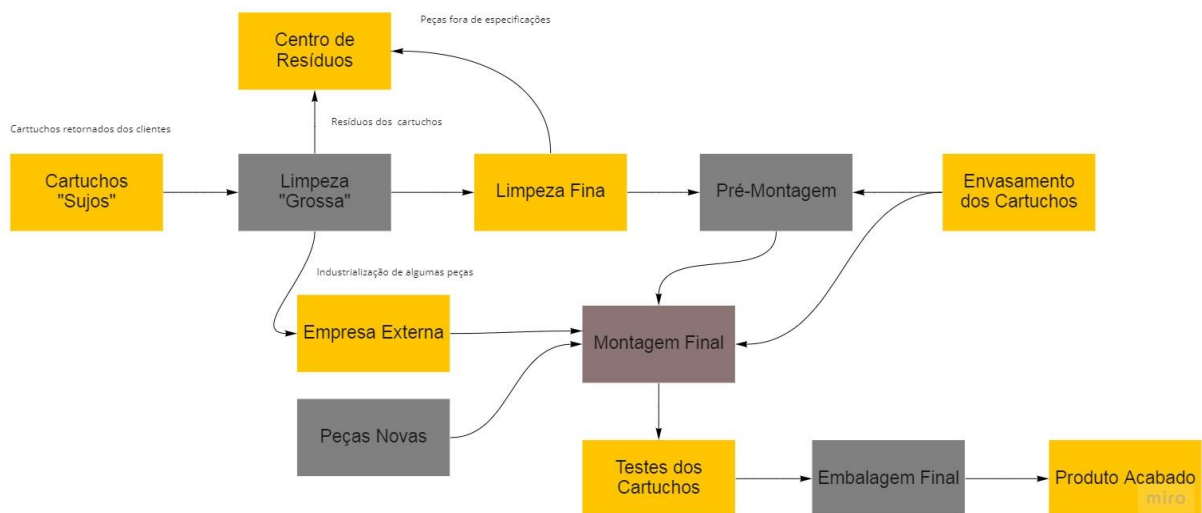


Fonte: Adaptado de Hilsdorf et al (2019) e Rezende (2019)

O fluxograma deixa exposto que inicialmente a impressora passa por uma inspeção visual. Trata-se de uma importante etapa que deve ser realizada por algum profissional experiente, já que alguns defeitos podem ser observados visualmente. Após essa etapa é realizada a limpeza do CORE (componentes ainda não desmontados), e pôr fim a desmontagem completa. Depois de desmontado, os componentes passam por uma limpeza mais completa, onde são limpos unitariamente. Depois de limpos os componentes são divididos em quatro categorias para que seus componentes sejam analisados individualmente e, se necessário, trocados por novos componentes. Por fim é realizada a montagem na mesma linha de um item novo, passando assim para a montagem e teste antes de chegar ao solicitante ou cliente (ALBUQUERQUE, 2019).

Em relação ao toner, a Figura 6 apresenta o fluxograma de remanufatura de toner uma impressora.

Figura 6 - Fluxograma de remanufatura do cartucho de toner



Fonte: Adaptado de Hilsdorf et al (2019) e Rezende (2019)

Após o entendimento das etapas de remanufatura das impressoras e dos cartuchos de toner, foram desenvolvidos dois modelos visando a análise ambiental e financeira destes processos. Inicialmente será apresentado o modelo ambiental, seguindo para o modelo financeiro.

4.2 MODELOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS

As Tecnologias da Informação (TI) têm tido contínuo crescimento de uso e como consequência aumento no consumo de equipamentos eletrônicos do segmento, surgindo preocupação com o descarte correto desses equipamentos dado a composição química e emissão de dióxido de carbono, também conhecido como gás carbônico (CO₂). O consumo desenfreado e a dependência cada vez maior por essas tecnologias sejam para uso doméstico ou empresarial, provocam um acúmulo de resíduo eletrônico que cresce de forma exponencial a cada ano que transcorre, seguindo o ritmo mundial do consumo marcado por grandes desperdícios de recursos naturais.

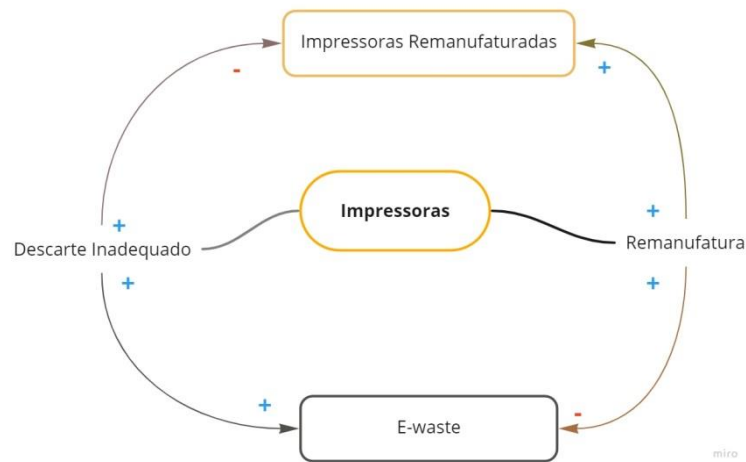
Destacam-se no resíduo eletrônico os equipamentos formados pelos grupos de cartuchos de tinta e cartuchos de toner, que são periféricos de impressoras de jato de tinta e a laser, comportando tintas ou pó formado por uma mistura de carbono com polímeros. Esses cartuchos, ao esgotarem o composto que armazenam, são substituídos, recarregados ou remanufaturados.

As tecnologias de informação têm provocado grandes impactos nas indústrias das mais variadas áreas possíveis, tornando-se uma tecnologia essencial para o aumento da competitividade no mundo globalizado que se encontra, onde a eficiência do processo produtivo depende da informatização. A TI aumenta a produção empresarial basicamente de duas formas diferentes: automação completa ou parcial dos processos e serviços de negócio; e melhoria da efetividade das informações na cadeia produtiva estendida (MANSUR, 2011).

A Tecnologia de Informação tem sido considerada como um dos componentes mais importantes do ambiente empresarial atual, sendo que as organizações brasileiras têm utilizado ampla e intensamente esta tecnologia tanto em nível estratégico como operacional (ALBERTIN, 2005).

Para os produtos que contêm materiais que, em sua produção, consomem muita energia, a remanufatura possibilita impactos ambientais significativamente menores. De fato, uma grande contribuição para os impactos ambientais totais dos produtos está relacionada à extração e processamento de materiais derivados de materiais primários (virgens) de estoque. Isso está especialmente relacionado ao uso de materiais escassos ou críticos (PECK, 2016). A remanufatura generalizada reduziria o impacto ambiental da sociedade. Para isso, seria necessário um aumento significativo na participação de mercado de produtos remanufaturados (MOENNE-LOCCOZ; SCHNEBELEN, 2015).

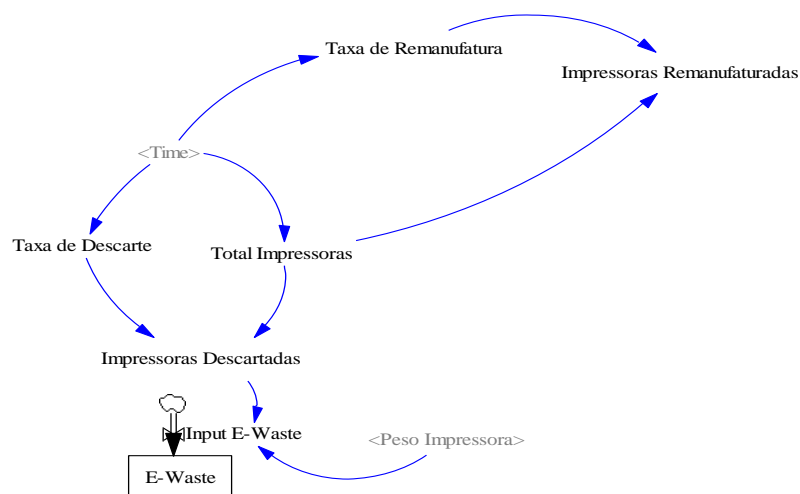
Figura 7 - Loop causal do modelo “Descarte/Remanufatura”



Fonte: Autor (2022)

O modelo responsável por armazenar o resíduo eletrônico está exposto na Figura 8, desenvolvido seguindo lógica do loop causal apresentado na figura 7. Ele é composto por variáveis de estoque, auxiliares, de fluxo e do tipo *shadow*, e é com este modelo que os cenários serão modificados. As variáveis “**Taxa de Descarte**” e “**Taxa de Remanufatura**” possibilitam variações no comportamento de descarte e de remanufatura das impressoras e seus componentes. As variações propostas pelo estudo corroboram com o estudo de Rezende (2019), que auxiliou na configuração dos valores de descarte e remanufatura deste estudo.

Figura 8 - Modelo “Descarte/Remanufatura”



Fonte: Autor (2022)

As taxas inseridas no modelo, combinadas com a variável auxiliar “**Total Impressoras**”, separam as quantidades de impressoras descartadas e remanufaturadas nas variáveis “**Impressoras Descartadas**” e “**Impressoras Remanufaturadas**”. Com isso, configurou-se o modelo de estoque com a variável de fluxo “**Input E-Waste**”. Essa variável, em combinação com a *shadow* “**Peso Impressora**”, acumula o total, em quilogramas, de resíduo eletrônico acumulado em dez anos na variável de estoque “**E-Waste**”. As equações utilizadas nesse modelo estão expostas no quadro 3.

Quadro 3 - Equações do modelo “*E-Waste*”

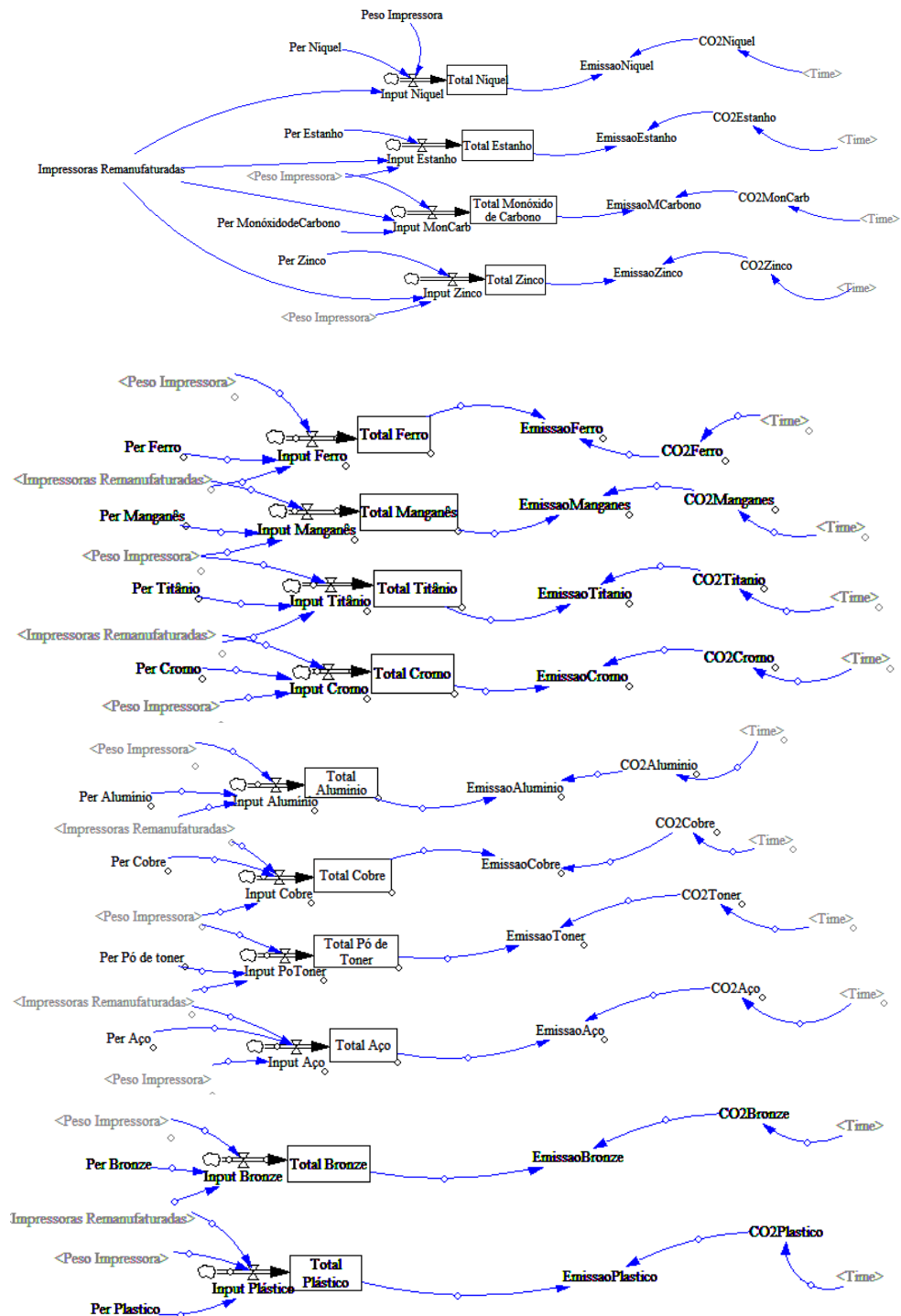
1. E-Waste" = "Input E-Waste" ; Initial Value = 0
2. "Input E-Waste" = Impressoras Descartadas*Peso Impressora
3. Impressoras Descartadas = Total Impressoras*Taxa de Descarte
4. Taxa de Descarte * Var cenário
5. Cenário Atual = Time ([[0,0)-(3000,10)],(2023,0.85),(2032,0.9))
6. Taxa de Remanufatura * Var cenário
7. Cenário Atual = Time ([[0,0)-(3000,10)],(2023,0.15),(2032,0.1))
8. Impressoras Remanufaturadas = Total Impressoras*Taxa de Remanufatura
9. Total Impressoras = Time ([[0,0)-(3000,1000)],(2023,1000),(2032,890)))

Fonte: Autor (2022)

Para modelar a emissão de CO₂ oriunda do descarte e a redução de CO₂ pela remanufatura de peças, foi necessária a separação dos componentes das impressoras, visto que não será necessária a produção de novas peças. Estas variáveis foram separadas nas seguintes categorias: níquel, estanho, monóxido de carbono, zinco, ferro, manganês, titânio, cromo, alumínio, cobre, pó de toner, aço, bronze e plástico.

Cada uma destas variáveis foi dividida em um modelo de estoque, seguindo a lógica do loop causal apresentado na Figura 7. A relação entre o percentual, a quantidade de impressoras e o peso das impressoras resulta no valor armazenado na variável de estoque, através de um fluxo com o *input* de cada uma. A Figura 9 representa o modelo de redução de CO₂ das impressoras que serão remanufaturadas. Vale ressaltar que existe certa emissão por este modelo, já que alguns componentes não poderão ser remanufaturados, necessitando seu descarte.

Figura 9 - Modelo “Emissão Remanufatura”



Fonte: Autor (2022)

Com relação à redução de emissão de CO₂, os dados são oriundos de Environment Protection Agency (EPA) (2016; 2021). Para dividir os minérios e outros matérias presentes em uma impressora, foram utilizados os estudos de Cutovoi (2019), Santos (2019) Vogtlander

et al (2017); Matsumoto e Umeda (2011); Tian et al, (2017), e Resende (2019) , além de coleta direta nas empresas parceiras. A tabela 1 mostra a relação de materiais presentes nas impressoras, bem como o seu peso e a sua composição no peso total dos equipamentos utilizados para análise deste estudo. Os materiais presentes nas impressoras foram divididos em percentuais de massa, isso possibilita a replicação do estudo com mais quantidade de impressoras. As equações utilizadas para o desenvolvimento do modelo “Emissão Remanufatura” estão expostas no quadro 4.

Tabela 1 -.Materiais presentes na composição das impressoras

Materiais	Kg	%
Níquel	0,02	0,10%
Estanho	0,55	3,60%
Monóxido de Carbono	0,04	0,25%
Zinco	0,36	2,34%
Ferro	0,09	0,59%
Manganês	0,28	1,81%
Cromo	0,04	0,28%
Titânio	0,16	1,07%
Alumínio	3,23	21,09%
Cobre	1,61	10,54%
Pó de toner	1,72	33,00%
Aço	6,49	10,41%
Bronze	0,02	0,80%
Plásticos	0,12	14,12%

Fonte: adaptado de TIAN et al, (2017).

Quadro 4 - Equações do modelo “Emissão Remanufatura”

10. Input Níquel = (Peso Impressora*Per Níquel)*Impressoras Remanufaturadas
11. Total Níquel = Input Níquel ; Initial Value = 0
12. CO₂Níquel = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.001),(2032,0.001))
13. EmissaoNíquel = Total Níquel*CO₂Níquel
14. Input Estanho = (Peso Impressora*Per Estanho)*Impressoras Remanufaturadas
15. Total Estanho = Input Estanho ; Initial Value = 0
16. CO₂Estanho = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.003),(2032,0.004))
17. EmissaoEstanho = Total Estanho*CO₂Estanho
18. Input MonCarb = (Peso Impressora*Per MonóxidodeCarbono)*Impressoras Remanufaturadas
19. Total Monóxido de Carbono = Input MonCarb ; Initial Value = 0
20. CO₂MonCarb = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.002),(2032,0.004))
21. EmissaoMCarbono = Total Monóxido de Carbono*CO₂MonCarb
22. Input Zinco = (Peso Impressora*Per Zinco)*Impressoras Remanufaturadas
23. Total Zinco = Input Zinco Initial Value = 0
24. CO₂Zinco = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.006),(2032,0.008))
25. EmissaoZinco = Total Zinco*CO₂Zinco
26. Input Ferro = (Peso Impressora*Per Ferro)*Impressoras Remanufaturadas
27. Total Ferro = Input Ferro; Initial Value = 0
28. CO₂Ferro = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,2),(2032,2.04))

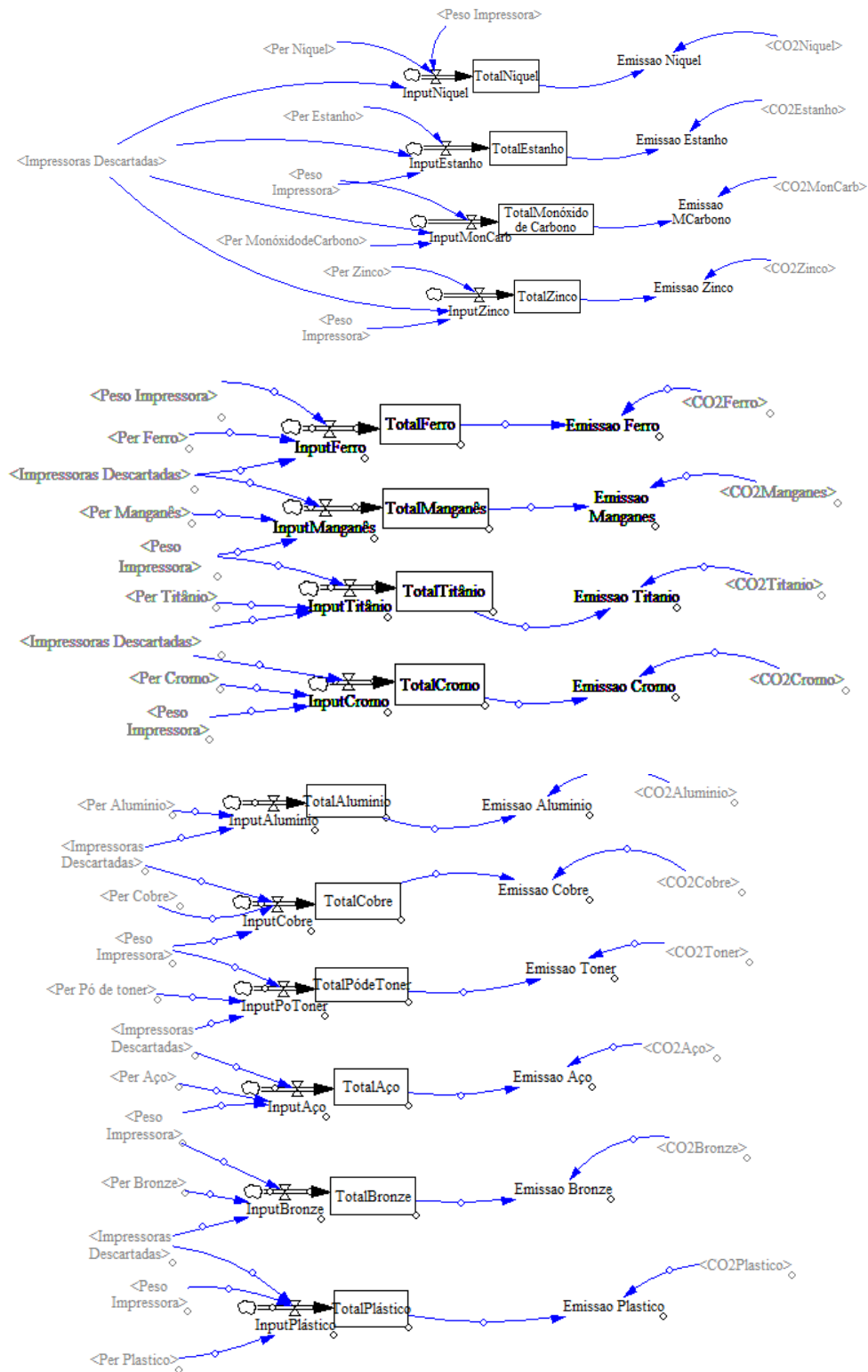
29. EmissaoFerro = Total Ferro*CO ₂ Ferro
30. Input Manganês = (Peso Impressora*Per Manganês)*Impressoras Remanufaturadas
31. Total Manganês = Input Manganês; Initial Value = 0
32. CO ₂ Manganês = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.05),(2032,0.08))
33. EmissaoManganes = Total Manganês*CO ₂ Manganes
34. Input Titânio = (Peso Impressora*Per Titânio)*Impressoras Remanufaturadas
35. Total Titânio = Input Titânio ; Initial Value = 0
36. EmissaoTitanio = Total Titânio*CO ₂ Titanio
37. CO ₂ Titanio = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.006),(2032,0.001))
38. Input Cromo = (Peso Impressora*Per Cromo)*Impressoras Remanufaturadas
39. Total Cromo = Input Cromo ; Initial Value = 0
40. CO ₂ Cromo = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.005),(2032,0.007))
41. EmissaoCromo = Total Cromo*CO ₂ Cromo
42. Input Alumínio = (Peso Impressora*Per Alumínio)*Impressoras Remanufaturadas
43. Total Aluminio = Input Alumínio ; Initial Value = 0
44. EmissaoAluminio = Total Aluminio*CO ₂ Aluminio
45. CO ₂ Aluminio = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.01),(2032,0.1))
46. Input Cobre = (Peso Impressora*Per Cobre)*Impressoras Remanufaturadas
47. Total Cobre = Input Cobre ; Initial Value = 0
48. CO ₂ Cobre = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.02),(2032,0.05))
49. EmissaoCobre = Total Cobre*CO ₂ Cobre
50. Input PoToner = (Peso Impressora*Per Pó de toner)*Impressoras Remanufaturadas
51. Total Pó de Toner = Input PoToner ; Initial Value = 0
52. EmissaoToner = Total Pó de Toner*CO ₂ Toner
53. CO ₂ Toner = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.6),(2032,0.8))
54. Input Aço = (Peso Impressora*Per Aço)*Impressoras Remanufaturadas
55. Total Aço = Input Aço; Initial Value = 0
56. EmissaoAço = Total Aço*CO ₂ Aço
57. CO ₂ Aço = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.001),(2032,0.003))
58. Input Bronze = (Peso Impressora*Per Bronze)*Impressoras Remanufaturadas
59. Total Bronze = Input Bronze ; Initial Value = 0
60. EmissaoBronze = Total Bronze*CO ₂ Bronze
61. CO ₂ Bronze = ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.003),(2032,0.004))
62. Input Plástico = (Peso Impressora*Per Plastico)*Impressoras Remanufaturadas
63. Total Plástico = Input Plástico ; Initial Value = 0
64. EmissaoPlastico = Total Plástico*CO ₂ Plastico
65. CO ₂ Plastico = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.5),(2032,0.77))
66.CO ₂ Remanufatura = EmissaoAço+EmissaoAluminio+EmissaoBronze+EmissaoCobre+EmissaoCromo+EmissaoFerro+EmissaoMang anes+EmissaoMCarbono+EmissaoNiquel+EmissaoPlastico+EmissaoTitanio+EmissaoToner+EmissaoZinco+Em issaoEstanho
67. CO ₂ Descarte = Emissao Aço+Emissao Aluminio+Emissao Bronze+Emissao Cobre+Emissao Cromo+Emissao Ferro+Emissao Manganes+Emissao MCarbono+Emissao Niquel+Emissao Plastico+Emissao Titanio+Emissao Toner+Emissao Zinco+Emissao
68. EstanhoEmissao CO ₂ = CO ₂ Descarte-CO ₂ Remanufatura

Fonte: Autor (2022)

As impressoras são equipamentos que possuem uma rotatividade considerável, sendo trocadas quase que anualmente, onde 88% delas são descartadas sem um cuidado ecológico, despejando diversos materiais no meio ambiente. (ALBUQUERQUE, 2019; RESENDE, 2019). Com relação à emissão de CO₂ oriundo do descarte das impressoras, o modelo que

reteve o valor desta emissão está exposto na Figura 10, desenvolvido seguindo a lógica do loop causal apresentado na Figura 7.

Figura 10 - Modelo “Emissão impressoras descartadas”

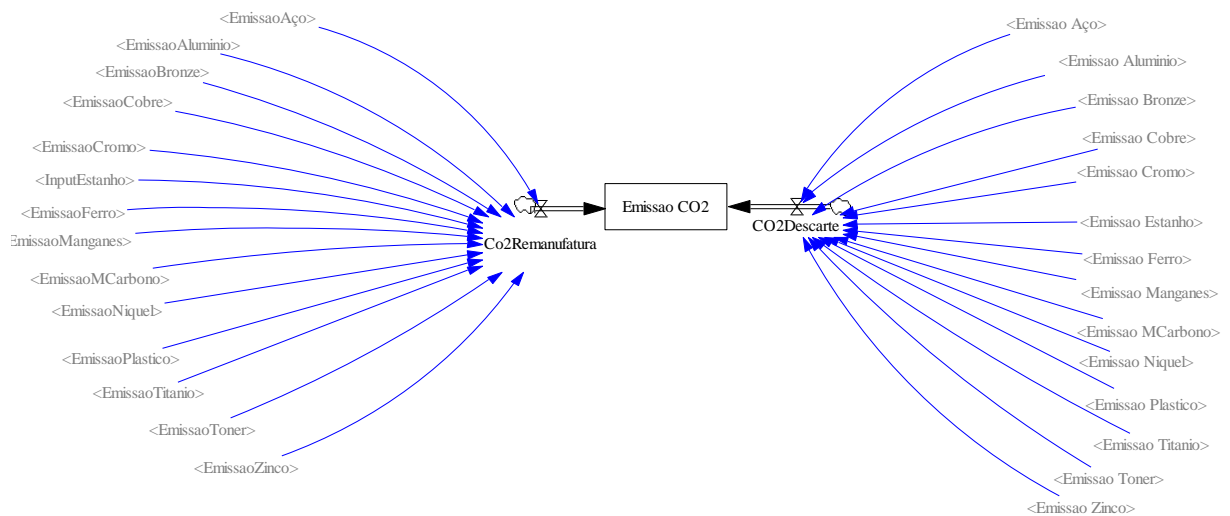


Fonte: Autor (2022)

A equações utilizadas para desenvolver o modelo “Emissão impressoras descartadas” estão expostas no quadro 5. Estas equações são oriundas das variáveis que armazenam os dados das impressoras que foram descartadas.

Quadro 5 - Equações do modelo “Emissão impressoras descartadas”

69. Input Níquel = (Peso Impressora*Per Níquel)*Impressoras Descartadas
70. Total Níquel = Input Níquel ; Initial Value = 0
71. CO ₂ Níquel = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.001),(2032,0.001))
72. EmissaoNíquel = Total Níquel*CO ₂ Níquel
73. Input Estanho = (Peso Impressora*Per Estanho)* Impressoras Descartadas
74. Total Estanho = Input Estanho ; Initial Value = 0
75. CO ₂ Estanho = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.003),(2032,0.004))
76. EmissaoEstanho = Total Estanho*CO ₂ Estanho
77. Input MonCarb = (Peso Impressora*Per Monóxido de Carbono)* Impressoras Descartadas
78. Total Monóxido de Carbono = Input MonCarb ; Initial Value = 0
79. CO ₂ MonCarb = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.002),(2032,0.004))
80. EmissaoMCarbono = Total Monóxido de Carbono*CO ₂ MonCarb
81. Input Zinco = (Peso Impressora*Per Zinco)*Impressoras Descartadas
82. Total Zinco = Input Zinco Initial Value = 0
83. CO ₂ Zinco = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.006),(2032,0.008))
84. EmissaoZinco = Total Zinco*CO ₂ Zinco
85. Input Ferro = (Peso Impressora*Per Ferro)*Impressoras Remanufaturadas
86. Total Ferro = Input Ferro; Initial Value = 0
87. CO ₂ Ferro = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,2),(2032,2.04))
88. EmissaoFerro = Total Ferro*CO ₂ Ferro
89. Input Manganês = (Peso Impressora*Per Manganês)*Impressoras Descartadas
90. Total Manganês = Input Manganês; Initial Value = 0
91. CO ₂ Manganes = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.05),(2032,0.08))
92. EmissaoManganes = Total Manganês*CO ₂ Manganes
93. Input Titânio = (Peso Impressora*Per Titânio)*Impressoras Descartadas
94. Total Titânio = Input Titânio ; Initial Value = 0
95. EmissaoTitanio = Total Titânio*CO ₂ Titanio
96. CO ₂ Titanio = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.006),(2032,0.001))
97. Input Cromo = (Peso Impressora*Per Cromo)*Impressoras Descatadas
98. Total Cromo = Input Cromo ; Initial Value = 0
99. CO ₂ Cromo = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.005),(2032,0.007))
100. EmissaoCromo = Total Cromo*CO ₂ Cromo
101. Input Alumínio = (Peso Impressora*Per Alumínio)*Impressoras Descartadas
102. Total Aluminio = Input Alumínio ; Initial Value = 0
103. EmissaoAluminio = Total Aluminio*CO ₂ Aluminio
104. CO ₂ Aluminio = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.01),(2032,0.1))
105. Input Cobre = (Peso Impressora*Per Cobre)*Impressoras Descartadas
106. Total Cobre = Input Cobre ; Initial Value = 0
107. CO ₂ Cobre = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.02),(2032,0.05))
108. EmissaoCobre = Total Cobre*CO ₂ Cobre
109. Input PoToner = (Peso Impressora*Per Pó de toner)*Impressoras Descartadas
110. Total Pó de Toner = Input PoToner ; Initial Value = 0
111. EmissaoToner = Total Pó de Toner*CO ₂ Toner
112. CO ₂ Toner = Time ([(0,0)-(3000,10)],(2023,0.6),(2032,0.8))
113. Input Aço = (Peso Impressora*Per Aço)*Impressoras Descartadas
114. Total Aço = Input Aço; Initial Value = 0
115. EmissaoAço = Total Aço*CO ₂ Aço

Figura 12 - Modelo “Emissão CO₂”

Fonte: Autor (2022)

O modelo “Emissão CO₂” é formado pela lógica de estoque e fluxo. Em suma, o modelo possui dois fluxos, sendo um responsável por armazenar os valores da emissão das impressoras remanufaturadas (“CO₂Remanufatura”) e outro para armazenar a da emissão das impressoras descartadas (“CO₂Descarte”). Os fluxos recebem seus valores de entrada pelas variáveis de emissões citadas anteriormente, sendo ambas variáveis *shadow*, já que são variáveis usadas em outros modelos. A relação entre as variáveis e os fluxos possibilita calcular a emissão de cada cenário projetado. Para Ngu, Lee e Osman (2020) remanufatura de componentes de impressoras é um importante fator para auxiliar na redução do aquecimento global. O Quadro 6 apresenta o modelo de equações do modelo Emissão CO₂.

Quadro 6 - Equações do modelo “Emissão CO₂”

<p>128. CO2Remanufatura = EmissaoAço+EmissaoAluminio+EmissaoBronze+EmissaoCobre+EmissaoCromo+EmissaoFerro+EmissaoManganes+EmissaoMCarbono+EmissaoNiquel+EmissaoPlastico+EmissaoTitanio+EmissaoToner+EmissaoZinco+EmissaoEstanho</p> <p>129.CO2Descarte = Emissao Aço+Emissao Alumínio+Emissao Bronze+Emissao Cobre+Emissao Cromo+Emissao Ferro+Emissao Manganes+Emissao MCarbono+Emissao Niquel+Emissao Plastico+Emissao Titanio+Emissao Toner+Emissao Zinco+Emissao Estanho</p> <p>130.Emissao CO2 = CO2Descarte-CO2Remanufatura</p>
--

Fonte: Autor (2022)

Em relação ao modelo financeiro, os dados foram coletados diretamente nas empresas parceiras do estudo e também em empresas especializadas na venda de produtos remanufaturados. A Tabela 2 apresenta o valor médio pago dos componentes de uma impressora a toner.

Tabela 2 - Média dos custos dos componentes de uma impressora a toner

Componente	Custo (R\$)	% Troca	CustoRem (R\$)	% Rem
Rolo pressor	26,25	21%	11,23	21%
Rolo Fusor	43,35	0,47%	33	0,47%
Placa Lógica	87,99	2%	27,89	2%
Placa Fonte	28,00	3%	11	3%
Bandejas	3,94	3%	1	3%
Buchas do Rolo Pressor	6,38	18%	6,38	18%
Cartucho de toner	33,21	14%	8,91	14%
Separador de Papel	13,99	5%	5,32	5%
Solenóide	17,99	0,94%	11,32	0,94%
Película Fusora	16,22	15%	4,56	15%
Lâmpada de Aquecimento	12,90	6%	12,9	6%
Roletes para puxar o papel	36,19	11,59%	15,12	11,59%

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 2 acima também apresenta o valor de um componente novo e de um componente remanufaturado. Percebe-se uma diferença importante no custo destes componentes, com destaque para a placa lógica, onde remanufatura possibilita uma economia de R\$ 60,00. O próprio cartucho de toner, objeto de análise deste estudo, se remanufaturado, possibilita uma economia de R\$ 24,00. Outro dado coletado é o percentual de troca ou remanufatura de um componente, dados estes importantes para a simulação dos cenários.

Para facilitar a identificação de cada variável presente no modelo desenvolvido, o quadro 7 apresenta a legenda cada uma usada no modelo.

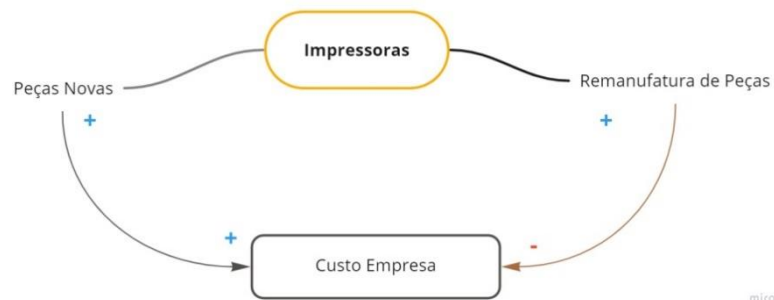
Quadro 7 - Legenda das variáveis

Nome	Legenda	Nome	Legenda
Bandejas	B	Placa Lógica	PL
Buchas do Rolo Pressor	BR	Roletes para puxar o papel	ROL
Cartucho de Toner	T	Rolo Fusor	RF
Lâmpada de Aquecimento	LA	Rolo pressor	RP
Película Fusora	P	Separador de Papel	SP
Placa Fonte	PF	Solenóide	SL

Fonte: Autor (2022)

Para o desenvolvimento do modelo financeiro, levou-se em consideração a lógica desenvolvida no loop causal apresentado na Figura 13, onde os cenários projetados, e suas respectivas variações, serão simulados.

Figura 13 - Loop causal do modelo financeiro

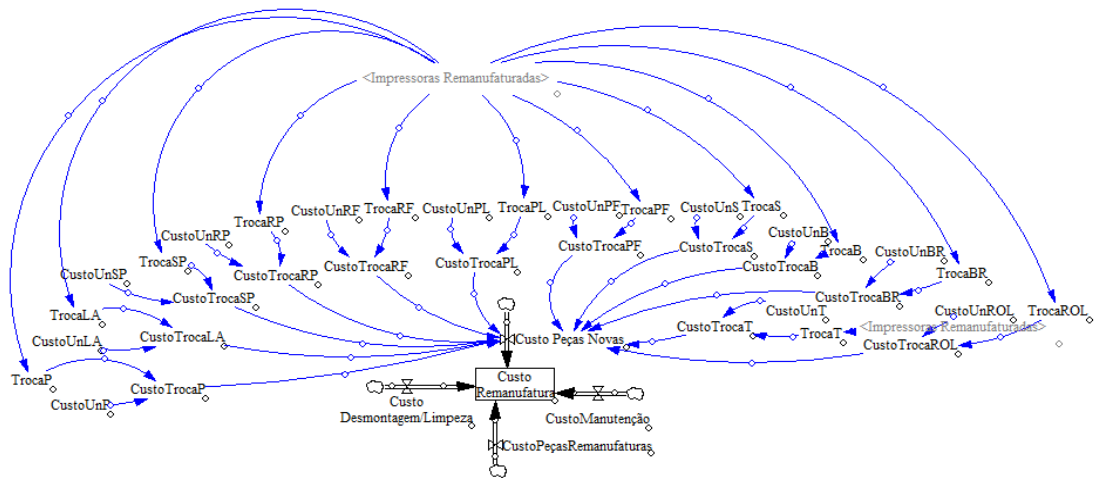


Fonte: Autor (2022)

A Figura 14 apresenta o modelo para calcular o custo das peças novas incluídas em uma impressora remanufaturada. Esse custo é referente apenas às impressoras remanufaturadas, não se aplicando às impressoras novas. O fluxo “**Custo Peças Novas**” é responsável por inserir o valor de entrada no estoque “**Custo Remanufatura**”, fluxo esse que armazena o custo da compra de peças novas, substituindo as peças que não poderão ser remanufaturadas. As variáveis auxiliares com a nomenclatura “**CustoTroca**”[Componente] são as variáveis que armazenam o custo de cada um dos componentes de uma impressora. Em todas as variáveis “**CustoTroca**” existem outras duas variáveis, com nomenclatura “**CustoUn**”[Componente]. Estas armazenam o valor unitário de cada um dos componentes, valor este que é calculado a partir de uma média entre diferentes componentes pesquisados.

Já as variáveis “**Troca**”[Componente] possibilitam ao modelo uma divisão dos percentuais de troca das peças. Os dados dos percentuais foram coletados diretamente em empresas que fazem a remanufatura de impressoras. Essa variação é importante para o modelo inserir a equivalência do comportamento real da localidade estudada. O Quadro 8, logo abaixo da figura, apresenta as equações utilizadas e também expõem os percentuais das trocas dos componentes.

Figura 14 - Modelo “Custo peças novas”



Fonte: Autor (2022)

Quadro 8 - Equações do modelo “Custo peças novas”

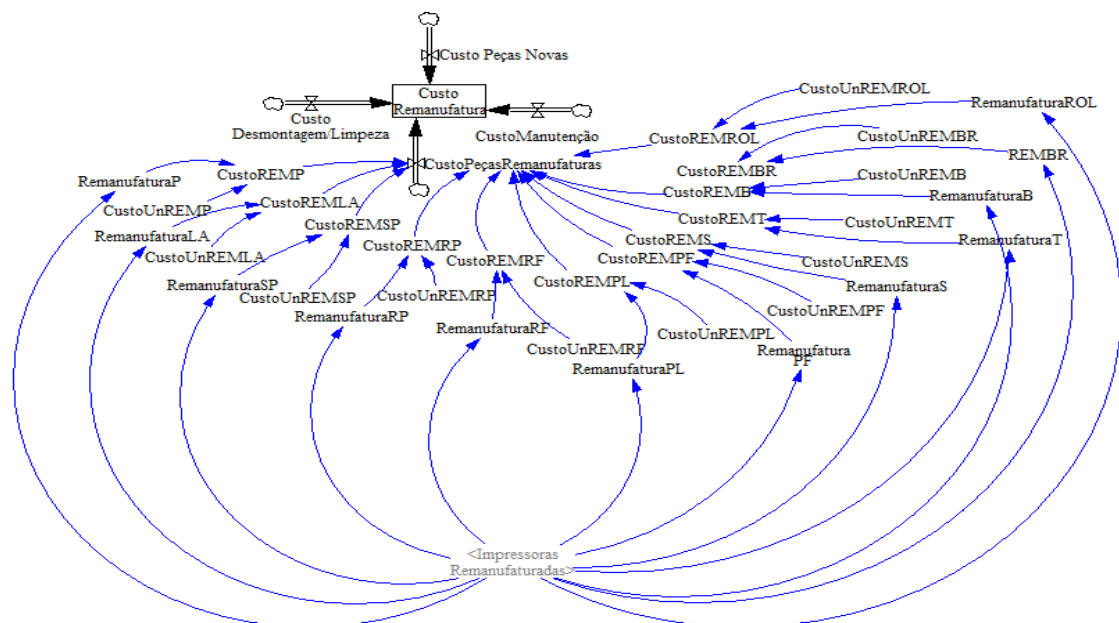
131. TrocaLA = Impressoras Remanufaturadas*0.006
132. CustoTrocaLA = CustoUnLA*TrocaLA
133. TrocaSP = Impressoras Remanufaturadas*0.005
134. CustoTrocaSP = CustoUnSP*TrocaSP
135. TrocaRP = Impressoras Remanufaturadas*0.02625
136. CustoTrocaRP = CustoUnRP*TrocaRP
137. TrocaRF = Impressoras Remanufaturadas*0.00047
138. CustoTrocaRF=CustoUnRF*TrocaRF
139. TrocaPL = Impressoras Remanufaturadas*0.002
140. CustoTrocaPL = CustoUnPL*TrocaPL
141. TrocaPF = Impressoras Remanufaturadas*0.0028
142. CustoTrocaPF = CustoUnPF*TrocaPF
143. TrocaS = Impressoras Remanufaturadas*0.00094
144. CustoTrocaS = CustoUnS*TrocaS
145. TrocaB = Impressoras Remanufaturadas*0.003
146. CustoTrocaB = CustoUnB*TrocaB
147. TrocaBR = Impressoras Remanufaturadas*0.0018
148. CustoTrocaBR = CustoUnBR*TrocaBR
149. TrocaT = Impressoras Remanufaturadas*0.0014
150. CustoTrocaT = CustoUnT*TrocaT
151. TrocaROL = Impressoras Remanufaturadas*0.00115
152. CustoTrocaROL = CustoUnROL*TrocaROL
153. Custo Peças = NovasCustoTrocaB++CustoTrocaBR+CustoTrocaLA+CustoTrocaP+CustoTrocaPF+CustoTrocaPL+CustoTrocaRF+CustoTrocaROL+CustoTrocaRP+CustoTrocaS+CustoTrocaSP+CustoTrocaT

Fonte: Autor (2022)

Para analisar o custo da remanufatura dos componentes médios de uma impressora a toner foi desenvolvido o fluxo exposto na Figura 15. O fluxo “**Custo Peças Remanufaturadas**” é responsável por inserir o valor de entrada no estoque “**Custo Remanufatura**”. Esse fluxo

armazena o valor do custo de remanufaturar uma impressora. As variáveis auxiliares com a nomenclatura “**CustoREM**”[Componente] são as variáveis que armazenam o custo total da remanufatura de cada um dos componentes de uma impressora. Em todas as variáveis “**CustoREM**”[Componente] existem outras duas variáveis. As variáveis com nomenclatura “**CustoUnREM**”[Componente] armazenam o valor de remanufatura unitário de cada um dos componentes. Este valor é recebido a partir de uma média entre diferentes componentes pesquisados.

Figura 15 - Modelo “Custo peças remanufuradas”



Fonte: Autor (2022)

Já as variáveis “**Remanufatura**”[Componente] possibilitam o modelo a divisão dos percentuais de remanufatura das peças. Os dados dos percentuais foram coletados diretamente em empresas que fazem a remanufatura de impressoras. Essa variação é importante para o modelo inserir a equivalência do comportamento real da localidade estudada. O quadro 9 apresenta as equações utilizadas e também expõem os percentuais de remanufatura dos componentes.

Quadro 9 - Equações do modelo “Custo peças remanufuradas”

154. RemanufaturaP = Impressoras Remanufuradas*0.015
155. CustoREMP = CustoUnREMP*RemanufaturaP
156. RemanufaturaLA= Impressoras Remanufuradas*0.006
157. CustoREMLA = CustoUnREMLA*RemanufaturaLA
158. RemanufaturaSP = Impressoras Remanufuradas*0.005
159. CustoREMSP = CustoUnREMSP*RemanufaturaSP
160. RemanufaturaRP = Impressoras Remanufuradas*0.021
161. CustoREMRP = CustoUnREMRP*RemanufaturaRP
162. RemanufaturaRF = Impressoras Remanufuradas*0.00047
163. CustoREMRF = CustoUnREMRF*RemanufaturaRF
164. RemanufaturaPL = Impressoras Remanufuradas*0.002
165. CustoREMPL = CustoUnREMPL*RemanufaturaPL
166. RemanufaturaPF = Impressoras Remanufuradas*0.0028
167. CustoREMPF = CustoUnREMPF*RemanufaturaPF
168. RemanufaturaS = Impressoras Remanufuradas*0.00094
169. CustoREMS = CustoUnREMS*RemanufaturaS
170. RemanufaturaT = Impressoras Remanufuradas*0.0014
171. CustoREMT = CustoUnREMT*RemanufaturaT
172. RemanufaturaB = Impressoras Remanufuradas*0.003
173. CustoREMB = CustoUnREMB*RemanufaturaB
174. REMBR = Impressoras Remanufuradas*0.0018
175. CustoREMBR = CustoUnREMBR*REMBR
176. RemanufaturaROL = Impressoras Remanufuradas*0.001159
177. CustoREMROL = CustoUnREMROL*RemanufaturaROL

Fonte: Autor (2022)

A Figura 17 armazena o comportamento dos custos de uma das etapas da remanufatura que é a desmontagem e a limpeza dos componentes. Para o custo desta etapa de remanufatura foi calculado o custo da mão de obra (hora trabalho) para desmontar e limpar todos os componentes. Este valor é armazenado na variável “**CustoMãoDeObraD**”. A variável auxiliar “**Custoálcoolisopropílico**” armazena o custo do produto utilizado para fazer a limpeza dos componentes. O valor calculado a partir do litro usado em cada impressora. O álcool isopropílico (IPA) em vários níveis de concentração é considerado um desinfetante (não para esporos bacterianos), virucida, fungicida, desinfetante e um agente de remoção de resíduos eficaz amplamente usado em salas limpas e outros ambientes controlados de contaminação. O quadro 10 apresentam as equações deste fluxo.

Quadro 10 - Equações do modelo “Custo desmontagem/limpeza”

178. CustoMãoDeObraD = Impressoras Remanufuradas*perrem
179. Custoálcool isopropílico = Impressoras Remanufuradas*0.0035
180. "Custo Desmontagem/Limpeza" = Custoálcool isopropílico+CustoMãoDeObraD

Fonte: Autor (2022)

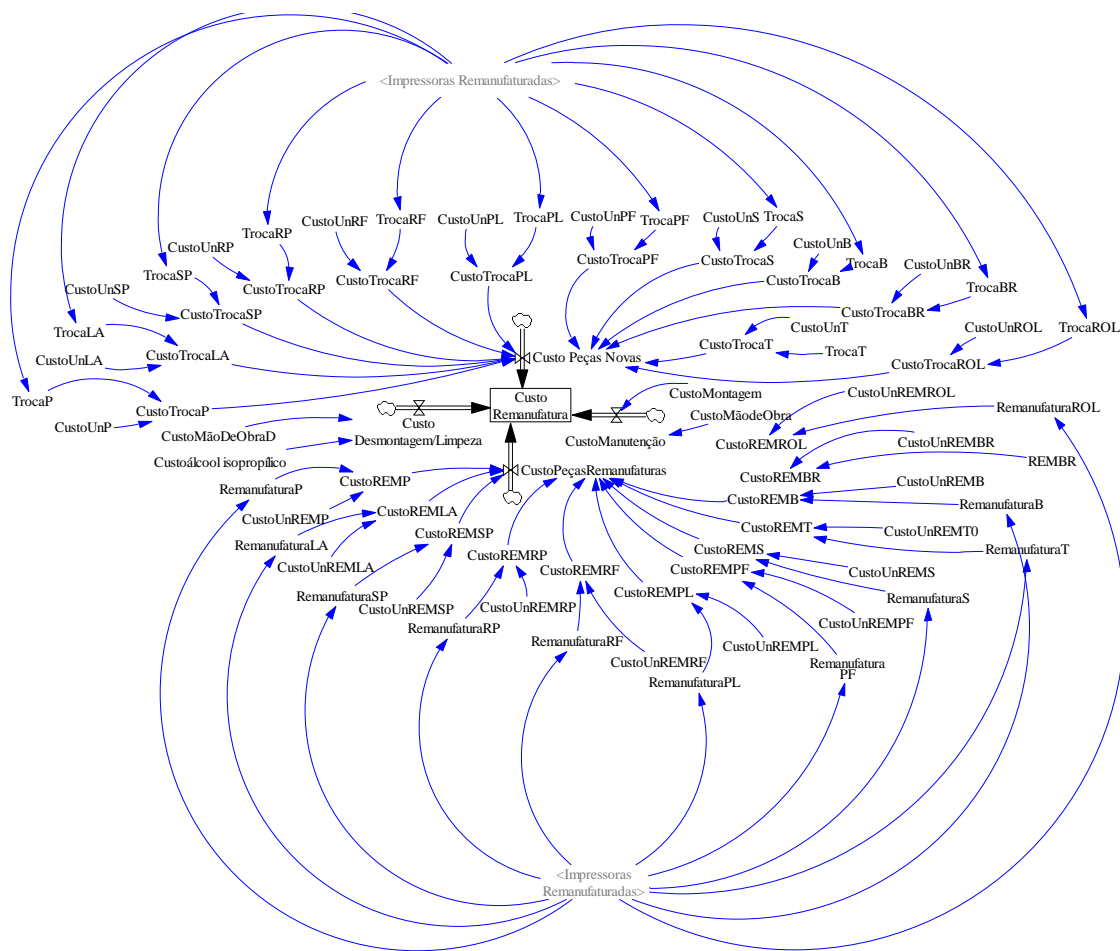
Quadro 11 - Equações do modelo “Custo manutenção”

181. $CustoMontagem = 15 * Impressoras\ Remanufaturadas$
182. $CustoMãodeObra = 4000 * 13$
183. $CustoManutenção = CustoMãodeObra + CustoMontagem$

Fonte: Autor (2022)

A Figura 18 apresenta o modelo do custo da Remanufatura com todos os seus fluxos.

Figura 18 – Modelo “Custo Remanufatura

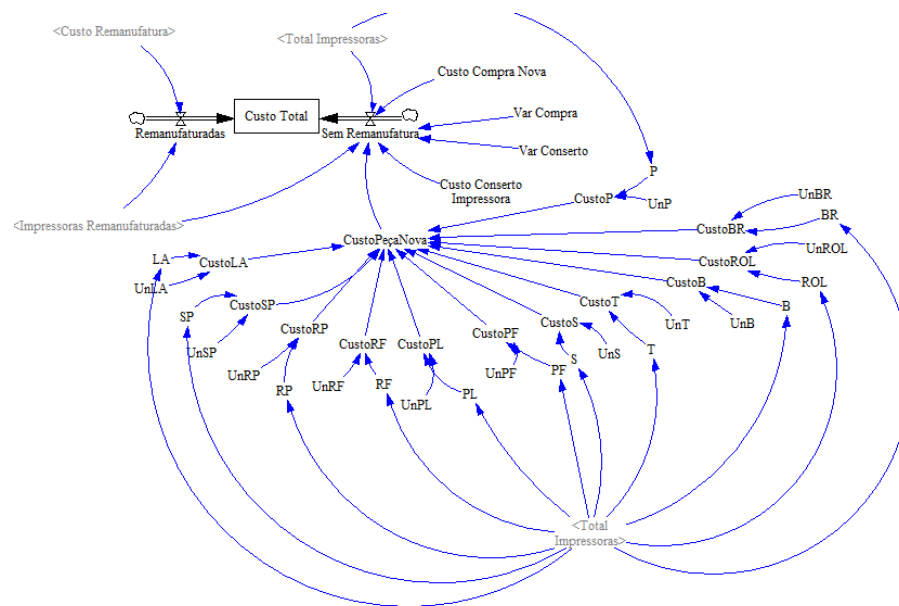


Fonte: Autor (2022)

Em relação ao custo total, a Figura 19 apresenta o modelo desenvolvido para calcular todos os custos envolventes nesta simulação. Para isso, desenvolveu-se um modelo baseado na lógica de fluxo e estoque. O estoque “Custo Total” recebeu os dados de entrada através dos fluxos “Remanufaturas” e “Sem Remanufatura”. Inicialmente o fluxo “Remanufaturas” reteve o custo das variáveis já calculadas anteriormente. No caso das

shadow “Custo Remanufatura” e “Impressoras Remanufaturadas”, o valor total da remanufatura será calculado. Já o fluxo “Sem Remanufatura” calcula o custo da produção ou compra de novas peças. O quadro 12 apresenta as equações utilizadas nesse modelo.

Figura 19 - Modelo “Custo total”



Fonte: Autor (2022)

Quadro 12 - Equações do modelo “Custo total”

184. Remanufaturadas = Custo Remanufatura*Impressoras Remanufaturadas
185. Sem Remanufatura = (((Total Impressoras-Impressoras Remanufaturadas)*Var Compra)*Custo Compra Nova)+(((Total Impressoras-Impressoras Remanufaturadas)*Var Conserto)*Custo Conserto Impressora)
186. CustoPeçaNova=
CustoB+CustoBR+CustoLA+CustoP+CustoPF+CustoPL+CustoRF+CustoROL+CustoRP+CustoS+CustoSP+Cu
stoT
187. Custo Total = Remanufaturadas+Sem Remanufatura

Fonte: Autor (2022)

Por fim, o último modelo desenvolvido é referente ao cartucho de toner das impressoras, apresentado na figura 20. O intuito é simular o impacto da remanufatura do cartucho de toner e seus componentes, inclusive o toner.

Um cartucho de toner é composto de alguns componentes, como Cilindro Fotocondutor, Lâmina de limpeza e dosadora, Rolo PCR, Rolo Magnético, Chip de Impressão, Pó de toner e o reservatório do pó de toner. Dentre os componentes o cilindro fotocondutor e a lâmina dosadora são os que mais necessitam de manutenção. O chip de

impressão também um componente que apresenta alguma frequência de problemas, porém não são todas as impressoras que o possuem.

O modelo foi baseado nessa lógica. Através do fluxo “**TonerRem**” o custo da remanufatura destes componentes foi calculado. A remanufatura destes cartuchos já é realizada nas empresas parceiras do estudo, facilitando assim a inserção dos valores das outras variáveis auxiliares e das suas taxas (Com Prefixo “Var”).

Em relação ao fluxo “**PeçasNovas**”, nele é calculado o custo das trocas das peças descartadas. Normalmente, por ser um produto frágil, os cartuchos apresentam componentes com defeito sem a possibilidade de remanufatura. Portanto uma nova peça deverá ser produzida ou comprada.

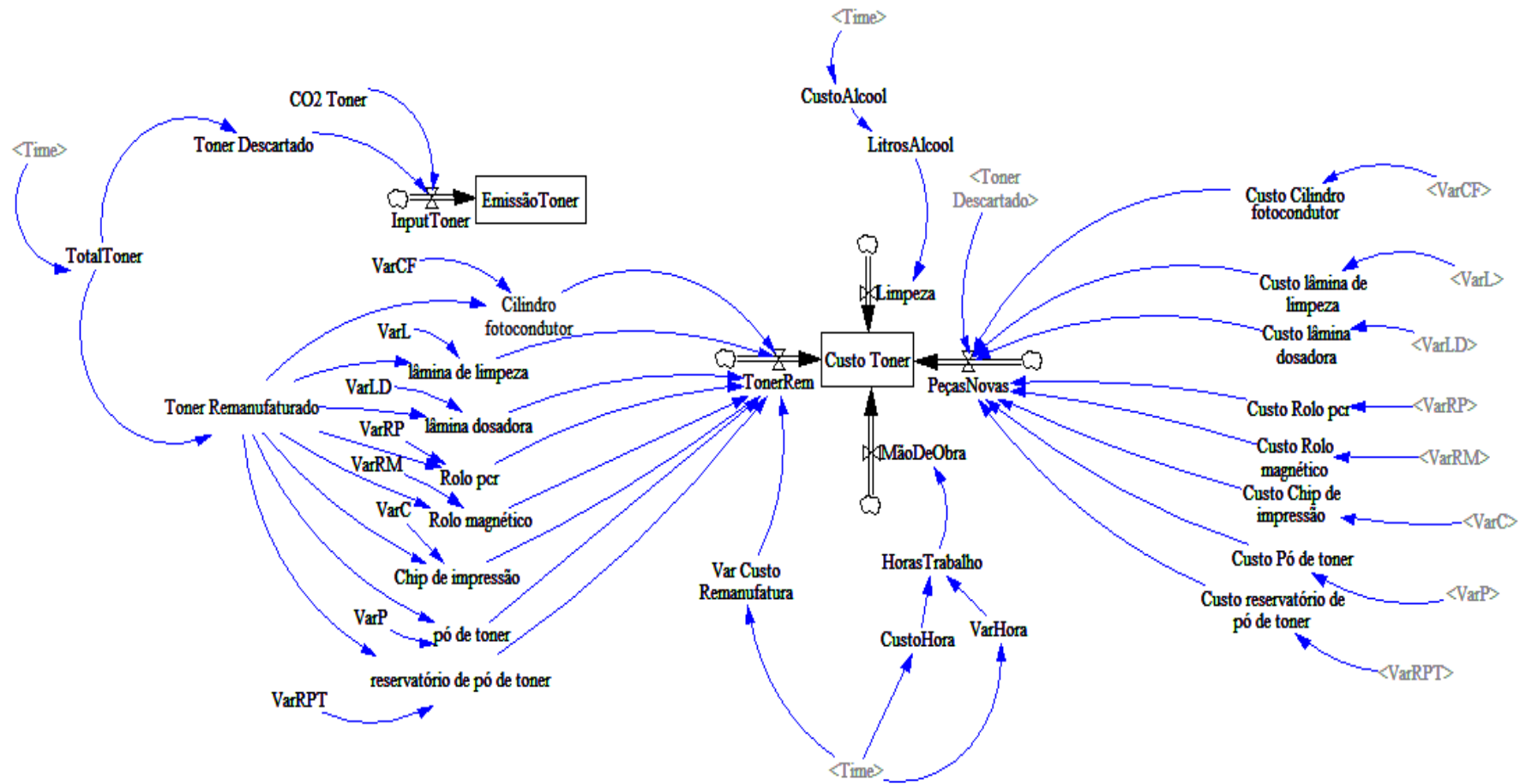
A limpeza é uma etapa importante da remanufatura e ela é calculada através do fluxo “**Limpeza**”. Em relação à desmontagem, montagem e inspeção, os custos destes processos são armazenados no fluxo “**MãoDeObra**”. Por fim o estoque “**CustoToner**” armazena o custo da remanufatura ou o custo da manutenção, e o estoque “**EmissãoToner**” armazena as emissões pelo descarte dos cartuchos de toner. O quadro 13 apresenta as equações deste modelo.

Quadro 13 - Equações do modelo “Custo desmontagem/limpeza”

188. $\text{InputToner} = \text{CO2 Toner} * \text{Toner Descartado}$
189. $\text{TotalToner} = \text{Time} ([(0,0) - (3000,1000)], (2023,1000), (2032,700))$
190. $\text{Toner Descartado} = \text{TotalToner} - (\text{TotalToner} * \text{VarCenário})$
191. $\text{Toner Remanufaturado} = \text{TotalToner} - (\text{TotalToner} * 0.2)$
192. $\text{TonerRem} = (\text{Chip de impressão} + \text{Cilindro fotocondutor} + \text{lâmina de limpeza} + \text{lâmina dosadora} + \text{pó de toner} + \text{reservatório de pó de toner} + \text{Rolo magnético} + \text{Rolo magnético} + \text{Rolo pcr}) * \text{Var Custo Remanufatura}$
193. $\text{PeçasNovas} = (\text{Custo Chip de impressão} + \text{Custo Cilindro fotocondutor} + \text{Custo lâmina de limpeza} + \text{Custo lâmina dosadora} + \text{Custo Pó de toner} + \text{Custo reservatório de pó de toner} + \text{Custo Rolo magnético} + \text{Custo Rolo pcr})$
194. $\text{Custo Toner} = (\text{Limpeza} + \text{MãoDeObra} + \text{PeçasNovas} + \text{TonerRem})$

Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Modelo “Remanufatura cartucho de toner”



Fonte: Autor (2022)

5 AVALIAÇÃO, EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O desenvolvimento de modelagem computacional para representação de sistemas do mundo real necessita de algumas etapas. Uma das etapas mais importantes são a verificação e a avaliação do modelo. Em relação ao modelo, este é uma representação do mundo real ou de parte dele. Portanto, tudo o que a avaliação precisa fazer é verificar se o comportamento do modelo e o do mundo real ocorre nas mesmas condições. Se a avaliação é positiva, o modelo é válido. Caso contrário, então o modelo não é válido. (PIDD, 1998; SIMONETTO et al, 2016)

Para Alves (2019) não é possível um modelo representar todo o sistema do mundo real, mas é possível definir relações entre os componentes do modelo de forma que permitam uma representação aceitável do mundo real. Marshall et al (2020) acredita que a verificação deve garantir que todos os requisitos para o desenvolvimento do modelo sejam devidamente contemplados nele e que não haja erros em seu desenho.

No desenvolvimento dos modelos apresentados na seção anterior, a verificação e a avaliação fizeram-se presentes em todas as etapas da sua concepção. Na primeira fase (modelo conceitual), foram utilizados dados de artigos científicos, relatórios e experimentos das empresas parceiras, e, também, contou com a participação de stakeholders para definir as variáveis da modelagem proposta.

Na segunda fase, quando da implementação no simulador VENSIM, foram utilizados dados históricos para a verificação da integração entre os módulos componentes do modelo, bem como dos resultados gerados, pois foram avaliadas as saídas produzidas pelo modelo de simulação a partir de dados reais fornecidos a estes. Em ambos os casos, os resultados foram satisfatórios e atenderam às expectativas.

Na terceira fase de verificação e avaliação, para a construção do experimento, foram utilizados dados e taxas de duas empresas de manutenção e venda de dispositivos de tecnologia de informação.

Para possibilitar a comparação dos resultados foram gerados três cenários. Vale ressaltar que não será analisada a remanufatura de todas as impressoras pelo fato de a maioria destes dispositivos já possuírem alguma peça sem a possibilidade de extensão do seu ciclo de vida.

- A. **Cenário Atual:** Responsável por inserir no modelo computacional o comportamento atual da remanufatura de impressoras a toner;
- B. **Cenário Mediano:** Primeira proposta do estudo, neste cenário analisa a remanufatura inicial (ano de 2023) de 30% atingindo em 2032 70% de remanufatura.
- C. **Cenário Otimista:** Segunda proposta do estudo, neste cenário analisa a remanufatura inicial (ano de 2023) de 50% atingindo em 2032 90% de remanufatura.

Após a definição dos três cenários para a experimentação do modelo, foram executadas as simulações no simulador Vensim, em um computador, com processador Pentium Core i5 e 16 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação foi na ordem de centésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado no experimento foi o de dez anos. Porém, a configuração dessa variável fica a cargo do projetista/usuário, pois esta depende da análise a ser feita.

Com o modelo desenvolvido, diversas análises podem ser executadas. No atual estudo, foram selecionadas as que pareceram ser mais relevantes na opinião do autor e dos stakeholders. É importante ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, sendo toda e qualquer análise do tipo “*what if*” de simples e fácil utilização, pois quando da modificação nos valores das taxas e variáveis, novos resultados são gerados para análise dos usuários.

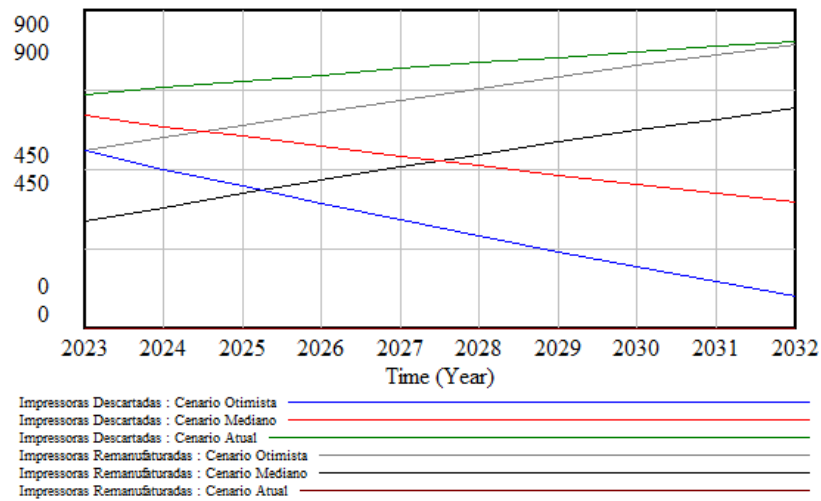
A análise foi dividida em dois capítulos, inicialmente será analisado a remanufatura da impressora de um modo geral, já o segundo capítulo abordará a remanufatura dos cartuchos dos toners.

5.1 ANÁLISE DA REMANUFATURA DE IMPRESSORAS

A Figura 21 apresenta a relação entre as impressoras Descartadas e as impressoras Remanufaturadas. O comportamento é semelhante ao estudo de Resende (2019) e, portanto, valida a informação deste modelo.

De modo a facilitar o entendimento das análises relativas ao quantitativo de impressoras com cartucho de toner que poderiam ser remanufaturados, a tabela 3 apresenta o total de cada grupo de classificação ao final do tempo simulado (dez anos). No cenário otimista para remanufatura das impressoras, poderiam ser produzidas 623 unidades. Já o cenário mediano será capaz de remanufaturar até 487 impressoras. O descarte em cada um dos cenários diminui entre 30 e 70 por cento.

Figura 21 - Impressoras descartadas x remanufaturadas



Fonte: Autor (2022)

Tabela 3 - Total de impressoras

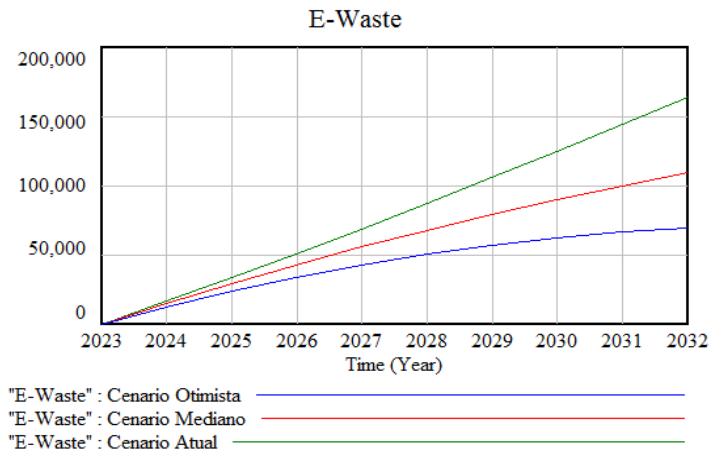
Cenários	Impressoras Remanufaturadas
Cenário Atual	200
Cenário Mediano	487
Cenário Otimista	623

Fonte: Autor (2022)

Os desafios na gestão do resíduo eletrônico (*e-waste*) surgem da falta de habilidades técnicas, infraestrutura precária, apoio financeiro inadequado e envolvimento inativo da comunidade, somando-se a isso o descaso ao descartar o mesmo (RAUTELA, et al, 2021).

O modelo de sociedade consumista aumenta a geração de resíduos sólidos e a preocupação com o impacto ambiental desses resíduos. Seu descarte adequado é um dos maiores problemas, principalmente em países subdesenvolvidos, pois o crescimento populacional intensifica o consumo capitalista, o que acarreta grandes mudanças socioambientais (TURUTE; SILVA; NERY, 2017; DUARTE et al, 2020).

Pela Figura 22 percebe-se que o cenário atual possui uma média anual de 15.000 kg de resíduo eletrônico descartado. Tal resíduo poderá causar danos ao meio ambiente devido ao descarte incorreto de resíduos eletrônicos, como a contaminação do solo e emissão de gases tóxicos que serão prejudiciais para a saúde humana (BAKHIYI et al., 2018; MINELGAITE; LIOBIKIENE, 2019)

Figura 22 - *e-waste*

Fonte: Autor (2022)

Buscando justificar o uso da remanufatura para a redução do descarte incorreto e também com a extensão do ciclo de vida de impressoras, projetaram-se dois cenários. Ambos não serão capazes de zerar o descarte incorreto, mas diminuí o percentual descartado se comparado ao cenário atual. No Brasil existem projetos de descarte correto, dispendo de serviços especializados na gestão de resíduos sólidos, bem como sua coleta, reciclagem e reutilização para transformação do resíduo eletrônico em matéria-prima, encaminhamento para projetos em comunidades, capacitação e geração de empregos (VARELA; MEDEIROS, 2014).

Em relação à comparação entre os cenários, percebe-se que o cenário mediano poderá reduzir o descarte incorreto em aproximadamente 60.000 kg de resíduos eletrônicos em dez anos, valor considerado bom para um cenário brasileiro. A tabela 4 apresenta o acúmulo de resíduo do cenário mediano. Percebe-se a diferença para o cenário atual. O cenário otimista apresentou melhor resultado, acumulando em 2032 aproximadamente 69 mil quilogramas de resíduos eletrônico, quase 100 mil quilogramas a menos que o cenário atual.

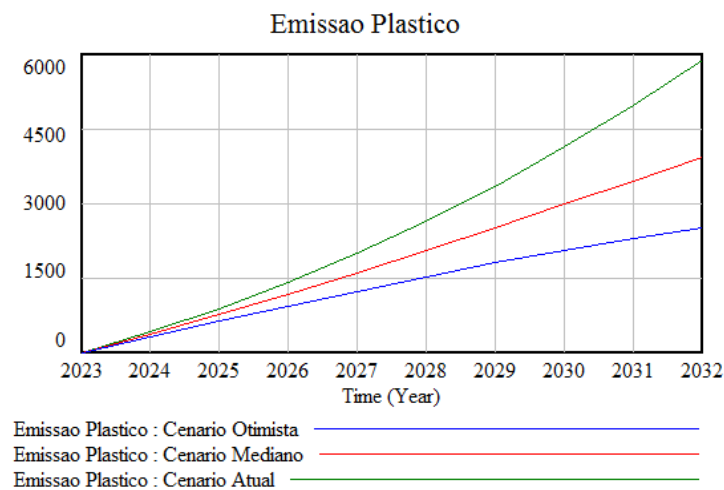
Tabela 4 - E-waste de cada cenário (Kg)

"E-waste" Runs			
Ano	Cenário Atual	Cenário Mediano	Cenário Otimista
2023	0	0	0
2024	16434	14940	12450
2025	33350.4	29150.8	23654.7
2026	50732.1	42646	33641.1
2027	68562.5	55439.1	42436.4
2028	86824.5	67543.6	50067.4
2029	105501	78973	56561.4
2030	124576	89740.8	61945.4
2031	144031	99860.7	66246.3
2032	163850	109346	69491.3

Fonte: Autor (2022)

Além dos resíduos eletrônicos, outros resíduos também são acumulados, como o plástico, já que alguns componentes possuem este material. A Figura 23 apresenta o potencial de emissão do descarte do plástico presente nas impressoras a toner.

Figura 23 - Emissão plástico



Fonte: Autor (2022)

O cenário atual é o maior emissor de CO₂ gerado pelo plástico. Em 2032, o cenário atual acumulará emissão de aproximadamente 5.887 Kg de CO₂. O cenário otimista reduzirá a emissão de CO₂ em aproximadamente cinquenta por cento. Em 2032 este cenário terá emitido cerca de 2.497 Kg de CO₂, valor que justifica a aplicação do estudo. O cenário mediano

emitirá em dez anos cerca de 1000 kg a menos que o cenário atual. A Tabela 5 apresentam os valores emitidos por ano de cada cenário.

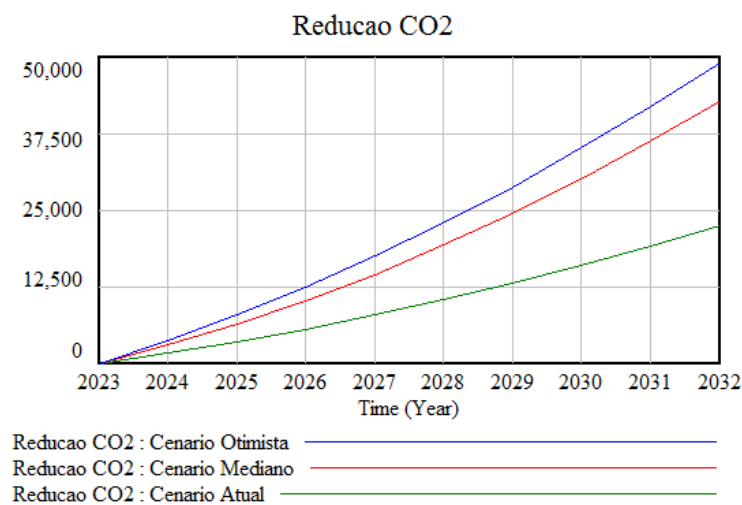
Tabela 5 - Emissão referente ao descarte do plástico (Kg)

"Emissão Plástico" Runs			
Ano	Cenário Atual	Cenário Mediano	Cenário Otimista
2023	0	0	0
2024	406.468	369.516	307.93
2025	871.556	761.808	618.176
2026	1396.83	1174.19	926.252
2027	1983.74	1604.04	1227.83
2028	2633.68	2048.82	1518.71
2029	3347.9	2506.08	1794.88
2030	4127.61	2973.41	2052.46
2031	4973.87	3448.52	2287.71
2032	5887.69	3929.17	2497.05

Fonte: Autor (2022)

Na última das análises mostradas neste estudo, avaliou-se o potencial de redução da emissão de CO₂ na atmosfera a partir da remanufatura das impressoras. Nessa análise, parte-se do pressuposto que, com o prolongamento do ciclo de vida de uma impressora, a redução de emissão de CO₂ é maior, já que a extensão do ciclo de vida das impressoras evita a produção de novas peças. Para a realização dos cálculos, foram utilizadas as taxas coletas a partir dos estudos apresentados anteriormente e também em estudos mais direcionados (LIAO; LI, 2021; REJESKI; ZHAO; HUANG, 2018).

Figura 24 - Redução CO₂



Fonte: Autor (2022)

A evolução anual da redução da emissão do CO₂ pode ser visualizada na Figura 24, na qual se verifica que, em ambos os cenários, houve redução das emissões, já que até no cenário atual existe remanufatura, porém em menor percentual que os outros cenários. No cenário otimista, no décimo ano simulado, as emissões foram reduzidas em 49.218 kg CO₂. Por sua vez, no cenário moderado, a redução total da emissão é de aproximadamente 39 mil kg/CO₂ no mesmo período.

Os dados totais de redução da emissão de CO₂ podem ser visualizados na Tabela 6. Uma análise comparativa com a situação atual de emissão de CO₂ apresenta o cenário otimista reduzindo em mais de 30 mil kg/CO₂, enquanto o cenário mediano reduz cerca de 20 mil kg/CO₂.

Tabela 6 - Redução da emissão de CO₂ (Kg)

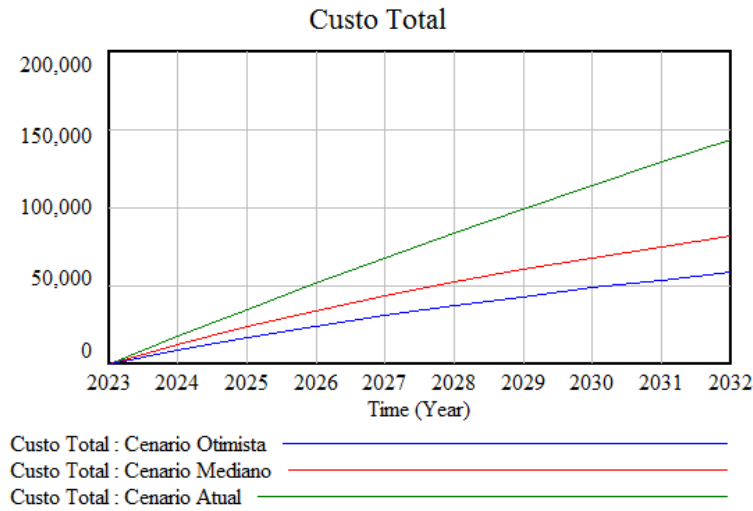
	Cenário otimista	Cenário moderado	Cenário atual
Redução da emissão CO ₂	49.218 kg	39.000 kg	30.000 kg

Fonte: Autor (2022)

A próxima análise realizada diz respeito aos benefícios financeiros que podem ser gerados com a remanufatura de impressoras em maior escala. A Figura 25 e a Tabela 7 apresentam os resultados relacionados aos possíveis benefícios financeiros dos cenários simulados.

Percebe-se o possível ganho financeiro com a redução de compras de peças novas, tendo por base os preços coletados diretamente nas empresas parceiras do estudo. No cenário mediano, o custo é de R\$ 81.353,00. Quando comparado com o cenário atual, o custo do cenário mediano representa uma redução de custos de aproximadamente R\$ 22.863,00. Em relação ao cenário otimista, o mesmo apresenta custo anual de aproximadamente R\$ 5.824,00, totalizando em 2032 R\$ 58.490,00. Em comparação com o cenário atual o desempenho é excelente, pois apresenta uma redução de custos de mais de 100% (R\$ 84.639,00). Os ganhos de ambos os cenários denotam uma excelente oportunidade de minimizar as perdas relativas às despesas com TICs.

Figura 25 - Custo total



Fonte: Autor (2022)

Tabela 7 - Custo total (R\$)

"Custo Total" Runs			
Ano	Cenário Atual	Cenário Mediano	Cenário Otimista
2023	0	0	0
2024	17430.2	12201.1	8715.08
2025	34468.2	23449.1	16.684
2026	51118.7	33811.5	23988.4
2027	67385.9	43357.4	30710.7
2028	83274.3	52157.7	36933.7
2029	98788.4	60284.3	42740.6
2030	113933	67810.1	48214.2
2031	.128711	74808.5	53436.9
2032	143129	81353.4	58490.5

Fonte: Autor (2022)

A remanufatura pode ser um negócio lucrativo, pois apresenta diversas vantagens econômicas e ambientais sobre a fabricação de novos produtos, reduzindo o uso de energia e matérias-primas na fabricação em relação à produção de novos produtos, o que é importante do ponto de vista ambiental (WANG et al. 2014; IJOMAH et al. 2007; BRAS; MCINTOSH, 1999)

Entre as vantagens econômicas, a remanufatura pode ser um processo lucrativo que custa menos que a fabricação convencional. Os retornos econômicos proporcionados pela remanufatura têm sido apontados como a principal motivação para os empreendedores

(OSTLIN; SUNDIN; BJORKMAN, 2009; BRAS; MCINTOSH, 1999; DELMAS; TOFFEL, 2004).

Dentre as vantagens ambientais, quando os processos de remanufatura são inseridos apropriadamente, os impactos ambientais podem ser reduzidos com o uso menor de matérias-primas e energia em relação à manufatura tradicional. Do ponto de vista do ciclo de vida do produto, essas vantagens são válidas (BRAS; MCINTOSH, 1999; SEITZ, 2007)

Além dessas vantagens, a remanufatura é motivada pelo aprimoramento da imagem da empresa, fornecimento de informações ambientais aos consumidores, responsabilidade ética, aprovação de legislação, fornecimento seguro de peças de reposição, aumento da participação de mercado e proteção da marca (OSTLIN; SUNDIN; BJORKMAN, 2009; SEITZ, 2007).

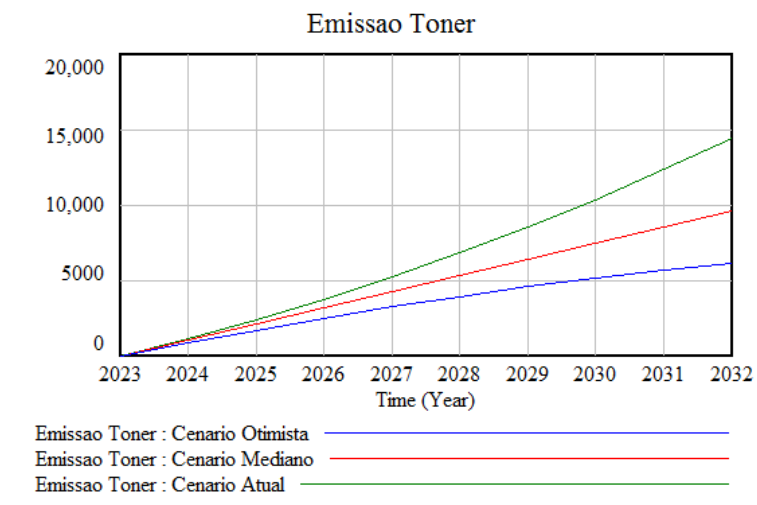
5.2 ANÁLISE DA REMANUFATURA DOS CARTUCHOS DE TONERS

Os Resíduos de Equipamentos Eletrônicos (REE) são a categoria de resíduos sólidos que mais tem crescido, em termos de geração, dentre os resíduos sólidos urbanos. Este grupo de resíduos contém computadores, televisores, celulares, impressoras, monitores, entre outros. Vários destes têm sido estudados exaustivamente em busca de soluções para a sua reciclagem, pois contêm metais de interesse econômico ou então elementos tóxicos (SANTOS, 2019).

Porém, os cartuchos de toners, devido às suas características, são produtos de difícil reciclagem, principalmente pela complexibilidade no desmonte e o risco associado ao pó remanescente dentro do cartucho. Foi analisado o descarte dos componentes, mas de um modo geral o maior impacto é causado pelo pó do toner. A Figura 26 apresenta o gráfico da emissão do toner.

A resina polimérica, utilizada na produção do pó de toner, é um copolímero de estireno e butadieno - ABS. Componentes mais comuns encontrados no pó de toner são resinas, cera, óxido de ferro (III), negro de fumo, pigmentos e metais de transição. Isto inclui óxidos de Manganês (Mn), Níquel (Ni), Cromo (Cr) e Titânio (Ti). Estudos apontam que o pó de toner pode apresentar os mais variados tipos de substâncias, incluindo Silício (Si) amorfo, dióxido de titânio, óxido de ferro III (Fe₂O₃) e outros, bem como Manganês (Mn), Ferro (Fe) e Cobre (Cu) (AHMADI et al, 2003; MARTIN et al, 2015).

Figura 26 - Emissão toner



Fonte: Autor (2022)

A remanufatura tem como objetivo a redução do impacto destes óxidos e substâncias no meio ambiente. Percebe-se que o cenário otimista é o com melhor desempenho, evitando a emissão em torno de 8 mil quilogramas de CO₂ quando comparado ao cenário atual. O cenário mediano apresenta redução inferior, porém maior que o cenário atual, sendo um cenário importante para a preservação ambiental.

Em relação ao impacto financeiro, a Figura 27 apresenta a simulação com diferentes percentuais de remanufatura.

Figura 27 - Custo toner



Fonte: Autor (2022)

O resultado aponta a importância da remanufatura para a redução de custos, sendo essa uma boa política para redução dos custos de produção e manutenção da empresa. O cenário otimista será capaz de economizar em torno de R\$ 66.000,00 comparado ao cenário atual, valor este considerável para uma empresa de pequeno porte. Já o cenário mediano, outro cenário importante para a remanufatura, economizará cerca de R\$ 34.000,00.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias de informação têm provocado grandes impactos nas indústrias das mais variadas áreas possíveis, tornando-se uma tecnologia essencial para o aumento da competitividade no mundo globalizado em que se encontra, onde a eficiência do processo produtivo à logística depende da informatização. Com o acelerado aumento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) nos últimos anos, o descarte dos resíduos oriundos destes equipamentos vem adquirindo cada vez mais importância no contexto ambiental.

Uma vez que a sua geração tende a aumentar, os efeitos adversos são observados no aumento da extração de matérias-primas e do consumo de energia, além da elevação dos volumes descartados em aterros sanitários e disposições inadequadas (lixões), com elevado potencial de danos à saúde humana e ambientais em virtude dos contaminantes presentes. Portanto, o descarte correto destes resíduos é altamente significativo do ponto de vista de impacto ambiental, tanto em relação ao volume de disposição final quanto à economia de recursos naturais.

Neste contexto, destacam-se os equipamentos formados pelos grupos de impressoras e cartuchos de toner, que são periféricos de impressoras de jato de tinta e a laser comportando tintas ou pó formado por uma mistura de carbono com polímeros. Nesses cartuchos, ao esgotarem o composto que armazenam são substituídos, recarregados ou remanufaturados.

Pensando no acúmulo de resíduos e o seu descarte incorreto, este estudo abordou a remanufatura destes dispositivos. O processo de remanufatura consiste em trazer um bem já desgastado à qualidade igual ou superior a de um novo bem com uma garantia equivalente. Portanto, esta dissertação teve por objetivo desenvolver e avaliar modelos de dinâmica de sistemas e propor cenários para apoio ao processo decisório envolvendo o impacto ambiental e financeiro na remanufatura de impressoras e de cartuchos de toner.

Para atingir o objetivo do estudo foi utilizada a modelagem a partir da dinâmica de sistemas, que se trata de uma abordagem de modelagem baseada em computador com base em um *feedback* controle e teoria da dinâmica não linear, que permite aos analistas e modeladores do sistema contabilizar as interações entre os subsistemas inter-relacionados que conduzem os comportamentos dinâmicos de um sistema ao longo do tempo.

Em relação ao impacto ambiental, os cenários observados apontam para uma importante redução de até 70% no descarte das impressoras, totalizando quase 100 mil Kg de resíduos eletrônicos deste equipamento gerados a menos que o cenário atual, totalizando

aproximadamente 600 equipamentos remanufaturados. Os cenários das emissões de CO₂ e do plástico também apresentaram resultados importantes. A emissão de CO₂ foi reduzida em aproximadamente 30 mil Kg com relação ao cenário atual, enquanto a emissão do plástico reduziu 50% do gerado no cenário atual. Estes dados mostram que a remanufatura é uma estratégia poderosa para a recuperação e reintrodução destes equipamentos eletroeletrônicos e seus componentes na cadeia produtiva, visto que possibilita a redução do consumo de recursos materiais e energéticos e do descarte de resíduos no meio ambiente, bem como das emissões de gases poluentes ao meio ambiente, principalmente o CO₂.

Além dos benefícios ambientais, são observados, também, benefícios econômicos. Os cenários analisados apresentam uma significativa redução de custos de mais de 100%. Percebe-se um possível ganho financeiro com a redução de compras de peças novas, tendo por base os preços coletados diretamente nas empresas parceiras do estudo. A remanufatura de EEE permite a recuperação e reutilização de materiais de alto valor agregado, e o custo de remanufatura tende a ser inferior ao custo de fabricação de um produto novo, possibilitando que o preço de venda de um produto remanufaturado seja inferior ao preço do produto original.

Os resultados apontam a importância da remanufatura, que servirá não só para reduzir o impacto do descarte dos resíduos eletrônicos, mas também possibilita às empresas um processo de redução de custos, sendo uma ferramenta para combater as crises financeiras.

Como limitações do estudo têm-se dados ambientais das emissões de alguns materiais que compõem as impressoras, além do modelo não considerarem a venda de produtos remanufaturados. Como trabalho futuro pretende-se expandir esse modelo para essa área, além de abordar dados ambientais mais precisamente.

REFERÊNCIAS

- AHMADI, A. *et al.* Life-cycle inventory of toner produced for xerographic processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 5, p. 573-582, 2003.
- ALBERTIN, A. L. **Tecnologia de informação e desempenho empresarial: as dimensões de seu uso e sua relação com os benefícios de negócio.** São Paulo: Atlas, 2005.
- ALBUQUERQUE, J. E. P. **Avaliação do descarte de cartuchos de impressoras e seus impactos no centro de ciências jurídicas e sociais da universidade federal de campina grande.** 2019. 23 p. Artigo (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, PB, 2019.
- ALVES, R. R. **Sustentabilidade empresarial e mercado verde: A transformação do mundo em que vivemos.** Petrópolis: Vozes, 2019.
- AMEZQUITA, T. *et al.* Characterizing the remanufacturability of engineering systems. In: international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. **American Society of Mechanical Engineers**, p. 271-278, 1995.
- ANDRADE, A. L. *et al.* **Pensamento sistêmico: caderno de campo.** Porto Alegre: Booking, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no brasil.** São Paulo, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no brasil.** São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 25 mar. 2022
- AYDIN, R. *et al.* Determining the optimal quantity and quality levels of used product returns for remanufacturing under multi-period and uncertain quality of returns. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v. 94, n. 9-12, p. 4401-4414, 2018.
- AYDIN, R.; KWONG, C. K.; JI, P. A novel methodology for simultaneous consideration of remanufactured and new products in product line design. **International journal of production economics**, v. 169, p. 127-140, 2015.
- AZEVEDO, J. L. A economia circular aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: **XI Congresso Nacional de Excelência em gestão.** 2015.
- BAG, S.; GUPTA, S.; FOROPON, C. Examining the role of dynamic remanufacturing capability on supply chain resilience in circular economy. **Management Decision**, Vol. 57, n. 4, pp. 863-885. 2018.
- BAKHIYI, B. *et al.* Has the question of e-waste opened a Pandora's box? An overview of unpredictable issues and challenges. **Environment international**, v. 110, p. 173-192, 2018.

BARQUET, A; FORCELLINI, F. Aspectos críticos na consolidação do sistema de remanufatura. **Revista produção online**, v. 9, n. 4, 2009.

BENYUS, J. M. **Biomimética – Inovação inspirada pela Natureza**. São Paulo: Editora Pensamento-Cultrix, 1997

BITENCOURT, J. S.; HERNÁNDEZ, C. T. Análise das práticas de logística reversa (LR) na região sul fluminense, após a implementação da política nacional de resíduos sólidos (PNRS). **Revista de administração, sociedade e inovação**, v. 8, n. 1, 2022.

BLOIS, H. D.; SOUZA, J. C. Cenários prospectivos e a dinâmica de sistemas: proposta de um modelo para o setor calçadista. **Revista de Administração de Empresas**, v. 48, n. 3, p. 35-45, 2008.

BOUSQUIN, J. *et al.* Life cycle assessment in the print industry: a critical review. **Journal of Industrial ecology**, v. 16, p. 195-205, 2012.

BRAS, B. A; HAMMOND, R. Towards Design for remanufacturing—metrics for assessing remanufacturability. In: **Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse**. Eindhoven, Netherlands, p. 5-22, 1996.

BRAS, B.; MCINTOSH, M. W. Product, process, and organizational design for remanufacture—an overview of research. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 15, n. 3, p. 167-178, 1999.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 12 out. 2019.

BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W. **Cradle to Cradle: criar e reciclar ilimitadamente**. 1. ed. São Paulo: Gustavo Gili Brasil, 2014.

BULMUS, S. C.; ZHU, S. X.; TEUNTER, R. Competition for cores in remanufacturing. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 1, p. 105-113, 2014.

BURGUER, M. *et al.* The heterogeneous skill-base of circular economy employment. **Research Policy**, v. 48, n. 1, p. 248-261, 2019.

CARDOSO, R. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012.

CARDOZO, C. M. F. **Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

CARTER, C. R.; ELLRAM, L. M. Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation. **Journal of business logistics**, v. 19, n. 1, p. 85, 1998.

CE100 BRASIL. **Uma economia circular do Brasil: uma abordagem exploratória inicial.** 2017. Disponível em:

https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf. Acesso em: 15 abr. 2019.

CETRULO, T. B. *et al.* Effectiveness of solid waste policies in developing countries: A case study in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 205, p. 179-187, 2018.

CHAOWANAPONG, J.; JONGWANICH, J.; IJOMAH, W. The determinants of remanufacturing practices in developing countries: evidence from Thai industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 369-378, 2018.

CHAPMAN A. *et al.* Remanufacturing in the U.K.: a snapshot of the U.K. remanufacturing industry. **Centre for Remanufacturing & reuse report**, 2010.

CIROTTA, M. F. S.; LÍBANO, A. M. **Abordagem do correto descarte de cartuchos de tinta e toners por meio de cartilha educativa.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas)-Centro Universitário de Brasília, Brasília, DF, 2013.

CLIFT, R.; DRUCKMAN, A. **Taking Stock of Industrial Ecology.** 1 ed. Guildford: Springer open, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20571-7>. Acesso em: 17 nov. 2021.

COLOMBO, R. **Aplicação de jogo de empresas: um experimento com geração randômica de cenários em sistemas dinâmicos.** 2003. Tese (Doutorado em Administração)-Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP, 2003.

COOPER, D. R.; GUTOWSKI, T. G. The environmental impacts of reuse: a review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 1, p. 38-56, 2017.

CORREA, R. G. **Análise da sustentabilidade do processo de remanufatura de equipamentos eletroeletrônicos: o caso das máquinas de lavar roupas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2019.

COSENZA, J.P.; ANDRADE, E.M.; ASSUNÇÃO, G.M. A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: analysis of the National Solid Waste Policy. **Revista de gestão ambiental e sustentabilidade**, 9(1), p. 1-28, 2020.

CUTOVOI, I. T. M. **Análise do posicionamento estratégico competitivo na remanufatura.** 2019. Tese (Doutorado em Administração)- Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, SP, 2019.

DEATON, M.; WINEBRAKE, J. J. **Dynamic modeling of environmental systems.** New York: Springer Science & Business Media, 1999.

DELMAS, M.; TOFFEL, M. W. Stakeholders and environmental management practices: an institutional framework. **Business strategy and the Environment**, v. 13, n. 4, p. 209-222, 2004.

DUARTE, L. F. A. *et al.* Lead toxicity on a sentinel species subpopulation inhabiting mangroves with different status conservation. **Chemosphere**, v. 251, p. 126394, 2020.

EGUREN, J. A. *et al.* Opportunities and incentives for remanufacturing in the Basque Country. **Procedia CIRP**, v. 73, p. 253-258, 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition**. Ellen MacArthur Foundation, 2015. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>. Acesso em: 15 fev. 2021.

ENCALADA, J. A. *et al.* The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. **European Journal of Operational Research**, v. 256, n. 2, p. 567-581, 2017.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Recognition and Management of Pesticide Poisonings: 6th Edition**. 2016. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-01/documents/rmpp_6thed_final_lowresopt.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Children’s Environmental Health (CEH) Research Roadmap**. 2021. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/researchroadmap_ceh_508.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

EUROPEAN REMANUFACTURING NETWORK . **Remanufacturing market study**. 2015. Disponível em: <https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2022.

FERREIRA, J. M. B.; FERREIRA, A. C. A sociedade da informação e o desafio da sucata eletrônica. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 157-170, 2008.

FORD, A. **Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems**. Washington: Island press, 1999.

FORRESTER, J. W. **Principles of systems: text and work book**, chapters 1 through 10. Wright-Allen Press, 1968.

FRAGA, M. A. C. H. C. **A economia circular na indústria portuguesa de pasta, papel e cartão**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial)–Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, PT, 2017.

GARCIA, J. M. **Theory and practical exercises of system dynamics: modeling and simulation with Vensim PLE**. MIT Sloan School of Management, 2020.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**, 4 ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GOLINSKA, P. *et al.* Grey decision making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 28-40, 2015.
- GOLINSKA, P.; KUEBLER, F. The method for assessment of the sustainability maturity in remanufacturing companies. **Procedia Cirp**, v. 15, p. 201-206, 2014
- GONÇALVES, J. C. **Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vensim PLE**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.
- GOVINDAN, K.; POPIUC, M. N. Reverse supply chain coordination by revenue sharing contract: A case for the personal computers industry. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 2, p. 326-336, 2014.
- GOVINDAN, K.; FATTAHI, M.; KEYVANSHOKOOH, E. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. **European Journal of Operational Research**, v. 263, n. 1, p. 108-141, 2017.
- GRAY, C.; CHARTER, M. Remanufacturing and product design. **International Journal of Product Development**, v. 6, n. 3-4, p. 375-392, 2008.
- GUARNIERI, P. **Logística Reversa: em busca do equilíbrio econômico e ambiental**. Recife: Clube de Autores, 2011.
- GUARNIERI, P.; HASS, D.; MONTEIRO, G. A mensuração dos efeitos financeiros e econômicos da logística reversa pela contabilidade ambiental. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 202-225, 2013.
- GUEDES, A.C.; OLIVEIRA, R.L.; LIMA, R.S. Lixo eletrônico e logística reversa: um estudo de caso em uma associação de catadores de materiais recicláveis. **Anais do XXX Encontro Nacional de Engenharia De Produção**, São Carlos, SP, Brasil, 2010.
- GUIDE Jr., V. D. R. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. **Journal of operations Management**, v. 18, n. 4, p. 467-483, 2000.
- GUIDE Jr., V. D. R.; JAYARAMAN, V.; LINTON, J. D. Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery. **Journal of operations Management**, v. 21, n. 3, p. 259-279, 2003.
- HAMMOND, R.; AMEZQUITA, T.; BRAS, B. A. Issues in the automotive parts remanufacturing industry: a discussion of results from surveys performed among remanufacturers. **Engineering Design and Automation**, v. 4, p. 27-46, 1998.
- HATCHER, G. D.; IJOMAH, W. L.; WINDMILL, J. F. C. Design for remanufacture: a literature review and future research needs. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17-18, p. 2004-2014, 2011.

- HATCHER, G. D.; IJOMAH, W. L.; WINDMILL, J. F. C. Design for remanufacturing in China: a case study of electrical and electronic equipment. **Journal of Remanufacturing**, v. 3, n. 1, p. 3, 2013.
- HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, H. **Capitalismo Natural: criando a próxima revolução industrial**. 1. ed. São Paulo: Cultrix, 2000.
- HAZEN, B. T.; MOLLENKOPF, D. A.; WANG, Y. Remanufacturing for the circular economy: An examination of consumer switching behavior. **Business Strategy and the Environment**, v. 26, n. 4, p. 451-464, 2017.
- HERMANSSON, H.; ÖSTLIN, J; SUNDIN, E. Development of an automatic cleaning process for toner cartridges. In: **Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses**. Springer, London, p. 257-261, 2007.
- HEYDARI, J.; GOVINDAN, K.; SADEGHI, R. Reverse supply chain coordination under stochastic remanufacturing capacity. **International Journal of Production Economics**, v. 202, p. 1-11, 2018.
- HILSDORF, W. C. *et al.* Aplicação de ferramentas do lean manufacturing: estudo de caso em uma indústria de remanufatura. **Revista Produção Online**, v. 19, n. 2, p. 640-667, 2019.
- HUANG, T. T.; SARTORI, V. C. Estudo sobre remanufatura de cartuchos de toner de impressora de duas faculdades da UNICAMP. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 8, n. 2, 2012.
- HUANG, Y.; WANG, Z. Values of information sharing: a comparison of supplier-remanufacturing and manufacturer-remanufacturing scenarios. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 106, p. 20-44, 2017.
- IJOMAH, W. L. Addressing decision making for remanufacturing operations and design-for-remanufacture. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 2, n. 2, p. 91-102, 2009.
- IJOMAH, W. L. *et al.* Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 23, n. 6, p. 712-719, 2007.
- ISMAIL, H. N. *et al.* Decision making system for designing products and production systems for remanufacturing activities. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 212-217, 2017.
- JABBOUR, C. J. C. *et al.* Unlocking the circular economy through new business models based on large-scale data: an integrative framework and research agenda. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 144, p. 546-552, 2019.
- JAPKE, O. Practice Guidelines: Development of a framework for assessing the economic benefits of remanufacturing. **Cranfield, UK: Cranfield University**, 2009.

JENSEN, J. P. *et al.* Creating sustainable value through remanufacturing: Three industry cases. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 304-314, 2019.

JUN, Y. S. *et al.* Evaluation of environmental impact and benefits for remanufactured construction equipment parts using life cycle assessment. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 288-295, 2019.

KAFUKU, J. M. *et al.* Investment decision issues from remanufacturing system perspective: literature review and further research. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 589-594, 2015.

KAZAZIAN, T. **Haverá a idade das coisas leves: design e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Senac São Paulo, 2005.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Electronic waste management approaches: An overview. **Waste management**, v. 33, n. 5, p. 1237-1250, 2013.

KLEINDORFER, P. R.; SINGHAL, K.; VAN WASSENHOVE, L. N. Sustainable operations management. **Production and operations management**, v. 14, n. 4, p. 482-492, 2005.

KRYSTOFIK, M. *et al.* Adaptive remanufacturing for multiple lifecycles: a case study in office furniture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 14-23, 2018.

LACERDA, D. *et al.* Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LACERDA, L. Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. **Rio de Janeiro: COPPEAD/UFRJ**, v. 6, 2002.

LAHROUR, Y.; BRISSAUD, D.; ZWOLINSKI, P. The strategy for implementing remanufacturing process in a commercial enterprise, the case study of a French company. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 554-559, 2019

LEITÃO, A. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. **Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting**, v. 1, n. 2, 2015.

LEITE, P, R.; LAVEZ, N.; SOUZA, V, M. Fatores da logística reversa que influem no reaproveitamento do “lixo eletrônico” – um estudo no setor de informática. In: **XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais-SIMPOI**, 2009.

LEITE, P. R. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 2003

LIAO, H.; LI, L. Environmental sustainability EOQ model for closed-loop supply chain under market uncertainty: A case study of printer remanufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, v. 151, p. 106525, 2021.

LINDAHL, M.; SUNDIN, E.; ÖSTLIN, J. Environmental issues with the remanufacturing industry. In: **13th CIRP international conference on Life Cycle Engineering: held at the Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, May 31st-June 2nd 2006**. Katholieke Universiteit Leuven, p. 447-452, 2006.

LIU, W. *et al.* Evaluating remanufacturing industry of China using an improved grey fixed weight clustering method—a case of Jiangsu Province. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2006-2020, 2017.

LUND, R. T. **Remanufacturing: the experience of the United States and implications for developing countries**. Washington, DC: World Bank, 1984.

LUND, R. **The database of remanufacturers**. Boston: Boston University. 2012.

MALEKI, L. *et al.* Determining the prices of remanufactured products, capacity of internal workstations and the contracting strategy within queuing framework. **Applied Soft Computing**, v. 54, p. 313-321, 2017.

MANSUR, R. **Governança de TI verde: o ouro verde da nova TI**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.

MARSHALL, J. *et al.* Disassembly of Li ion cells—Characterization and safety considerations of a recycling scheme. **Metals**, v. 10, n. 6, p. 773, 2020.

MARTIN, J. *et al.* Occupational exposure to nanoparticles at commercial photocopy centers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 298, p. 351-360, 2015.

MARTIN, L. A. **Beginner modeling exercises**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology (MIT). 2001.

MATSUMOTO, M. *et al.* Trends and research challenges in remanufacturing. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technology**, v. 3, n. 1, p. 129-142, 2016.

MATSUMOTO, M.; UMEDA, Y. An analysis of remanufacturing practices in Japan. **Journal of Remanufacturing**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2011.

MATTOS, K. M. C.; MATTOS, K. M. C.; PERALES, W. J. S. Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 28, 2008.

MEDEIROS, F.S.B. **Modelo para a operacionalização da atividade de remanufatura**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração, da Universidade Federal de Santa Maria, 2020

MEDEIROS, F.S.B.; SIMONETTO, E. O. Remanufatura: uma visão acerca da pesquisa acadêmica e dos hot topics na base de dados do isi web of science (wos). **Revista Unifamma**, v. 17, p. 1-24, 2019.

- MINELGAITĖ, A.; LIOBIKIENĖ, G. Waste problem in European Union and its influence on waste management behaviours. **Science of the Total Environment**, v. 667, p. 86-93, 2019.
- MISHRA, S. *et al.* Evaluating indicators for international manufacturing network under circular economy. **Management Decision**, Vol. 57, n. 4, pp. 811-839, 2019.
- MITRA, S.; WEBSTER, S. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies. **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 287-298, 2008.
- MOENNE-LOCCOZ, G.; SCHNEBELEN, N. Remanufacturing implementation within Neopost: key success factors and insight into the measurements of its environmental, economic and social benefits. In: **International conference on remanufacturing**, Amsterdam, Abstracts and Papers. 2015.
- MOURA, F. P. *et al.* Processamento de cartuchos de impressoras de jato de tinta: um exemplo de gestão de produto pós-consumo. **Química Nova**, v. 35, n. 6, p. 1271-1275, 2012.
- MURANKO, Z. *et al.* Circular economy and behaviour change: Using persuasive communication to encourage pro-circular behaviours towards the purchase of remanufactured refrigeration equipment. **Journal of cleaner production**, v. 222, p. 499-510, 2019.
- MUSSE, J. **Backcasting e dinâmica de sistemas como instrumentos para criar conhecimento em sistemas complexos, visando à tomada de decisão**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.
- NAKAJIMA, K. *et al.* Development of multi-value circulation based on remanufacturing. **Matériaux & Techniques**, v. 107, n. 1, p. 103, 2019.
- NGU, H. J.; LEE, M. D.; OSMAN, M. S. B. Review on current challenges and future opportunities in Malaysia sustainable manufacturing: Remanufacturing industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123071, 2020.
- ÖSTLIN, J.; SUNDIN, E.; BJÖRKMAN, M. Product life-cycle implications for remanufacturing strategies. **Journal of cleaner production**, v. 17, n. 11, p. 999-1009, 2009.
- OTIENO, W.; LIU, Y. Warranty analysis of remanufactured electrical products. In: **2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. p. 734-743, 2016.
- OVCHINNIKOV, A. Revenue and cost management for remanufactured products. **Production and Operations Management**, v. 20, n. 6, p. 824-840, 2011.
- PAIVA, L. M. **A remanufatura de equipamentos eletroeletrônicos como contribuição para o desenvolvimento sustentável: uma avaliação do caso dos refrigeradores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2013.

PAULI, G. **The blue economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs**. Taos: Paradigm Publications, 2010.

PECK, D. Prometheus missing: critical materials and product design. **Delft University of Technology**, v. 10, 2016.

PIDD, M. **Modelagem Empresarial – Ferramentas para a Tomada de Decisão**. Porto Alegre: Bookman. 1998.

PINA, L. G.; FLORENCIO, M. N. S.; COSTA, B. M. G. Gerenciamento de resíduos sólidos: um estudo de caso aplicado no consórcio público do agreste central. **Revista Valore**, v. 7, n. 1, p. 152-164, 2022.

PINHEIRO, M.A.P. *et al.* The role of new product development in underpinning the circular economy: A systematic review and integrative framework. **Management Decision**, Vol. 57, n. 4, pp. 840-862, 2019

PISITSANKKHAKARN, R.; VASSANADUMRONGDEE, S. Enhancing purchase intention in circular economy: An empirical evidence of remanufactured automotive product in Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104702, 2020.

PRENDEVILLE, S.; BOCKEN, N. Design for remanufacturing and circular business models. In: **Sustainability through innovation in product life cycle design**, p. 269-283, 2017.

RAUTELA, R. *et al.* E-waste management and its effects on the environment and human health. **Science of the Total Environment**, v. 773, p. 145623, 2021.

REIKE, D.; VERMEULEN, W.; WITJES, S. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? - exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 246-264, 2018.

REJESKI, D.; ZHAO, F.; HUANG, Y. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 19, p. 21-28, 2018.

REZENDE, J. R. S. **Remanufatura de equipamentos eletrônicos: aplicabilidade**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

ROCHA, A. C.; CERETTA, G. F.; CARVALHO, A. P.. Lixo eletrônico: um desafio para a gestão ambiental. **Revista TechnoEng**, v. 1(2), p. 35-49, 2010.

RODRIGUES, A. C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, SP, 2007.

RODRIGUES, G.O. **Um modelo de simulação computacional para avaliação da sustentabilidade ambiental e financeira através do uso de óleo de cozinha reciclado em veículos coletores de resíduos.** 2017. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

RUSCHIVAL, C. B. **Proposta de uma sistemática para o redesign de produtos para a remanufatura.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2012.

SALES, E. *et al.* O lixo eletrônico e as suas potencialidades: um estudo das teses e dissertações nos últimos 3 anos. **In: 6º Fórum Internacional Ecoinnovar**, 2017..

SANTOS, J. W. **Caracterização e separação dos materiais presentes em cartuchos de toner pós consumo: avaliando o potencial econômico para reciclagem.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mina, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

SASIKUMAR, P.; KANNANA, G.; HAQ, A. N. A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery - a case of truck tire remanufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, n. 9, p. 1223-1234, 2010.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, v. 17, p. 48-56, 2016.

SCHENKEL, M. *et al.* Understanding value creation in closed loop supply chains—Past findings and future directions. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 729-745, 2015.

SCHNEIDER, J. R. *et al.* Simulação baseada em systems dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos eletrônicos numa instituição de ensino superior. **In: XVIII Seminários em Administração—SEMEAD, São Paulo, SP**, p. 04-06, 2015.

SCOMAZZON, P. **Proposta de metodologia para desenvolvimento de produtos orientados à economia circular.** 2018. Monografia (Graduação em Design) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, RS, 2018.

SEHNEM, S.; PEREIRA, S. C. F. Rumo à economia circular: sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v. 18, n. 1, p. 35-62, 2019.

SEITZ, M. A. A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11-12, p. 1147-1157, 2007.

SHAH, P.; GOSAVI, A.; NAGI, R. A machine learning approach to optimise the usage of recycled material in a remanufacturing environment. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 4, p. 933-955, 2010.

SHIBAO, F. Y.; MOORI, R. G.; SANTOS, M.R. A logística reversa e a sustentabilidade empresarial. **Seminários em administração**, v. 13, 2010.

SHU, L. H.; FLOWERS, W. C. Application of a design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 15, n. 3, p. 179-190, 1999.

SILVA, B. G. **Gestão dos resíduos eletrônicos da ufsm: viabilidade e implementação de uma política de reciclagem.** 2013. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

SILVA, E. **O impacto da gestão do tamanho da força policial na taxa de violência em Curitiba: uma abordagem qualitativa sob o referencial da dinâmica de sistemas.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.

SIMONETTO, E. O. *et al.* Um modelo de dinâmica de sistemas para avaliação do reaproveitamento de resíduos eletrônicos na remanufatura de computadores em uma instituição de ensino superior. **Exacta**, v. 14, n. 3, p. 385-402, 2016.

SINGHAL, D.; TRIPATHY, S.; JENA, S. K. Acceptance of remanufactured products in the circular economy: an empirical study in India. **Management Decision**, Vol. 57 No. 4, pp. 953-970, 2019.

SINGHAL, D.; TRIPATHY, S.; JENA, S. K. Remanufacturing for the circular economy: Study and evaluation of critical factors. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104681, 2020.

SITCHARANGSIE, S.; IJOMAH, W.; WONG, T. C. Decision makings in key remanufacturing activities to optimise remanufacturing outcomes: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 232, p. 1465-1481, 2019.

STAHEL, W. **The Performance Economy.** 2. ed. London: Palgrave Macmillan, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/9780230288843>. Acesso em: jan. 2022.

STERMAN, J.D. **System dynamics modeling: tools for learning in a complex world.** Boston: McGraw-Hill, p. 982, 2000.

SUNDIN, E. **Product and process design for successful remanufacturing.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) -. Linköping University, Linköping, Suécia, 2004.

SUNDIN, E.; BJORKMAN, M.; JACOBSSON, N. Analysis of services elling and design for remanufacturing. In: **Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No. 00CH37082).** IEEE, p. 272-277, 2000.

SUNDIN, E.; DUNBÄCK, O. Reverse logistics challenges in remanufacturing of automotive mechatronic devices. **Journal of Remanufacturing**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 2013.

SUNDIN, E.; LINDAHL, M. Rethinking product design for remanufacturing to facilitate integrated product service offerings. In: **2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment.** IEEE, p. 1-6, 2008.

SUNDIN, E; LINDAHL, M.; IJOMAH, W. Product design for product/service systems: Design experiences from Swedish industry. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 20, n. 5, p. 723-753, 2009.

SWAANS, M. J. *et al.* Survival of transcatheter mitral valve repair compared with surgical and conservative treatment in high-surgical-risk patients. **JACC: Cardiovascular Interventions**, v. 7, n. 8, p. 875-881, 2014.

TIAN, X. *et al.* Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. **Journal of cleaner production**, v. 142, p. 1609-1618, 2017.

TREVISAN, B. *et al.* Desenvolvimento e caracterização de compósitos de borracha natural com subprodutos de cartuchos de toners. **ETIC-ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-ISSN 21-76-8498**, v. 12, n. 12, 2016.

TURKI, S.; REZG, N. Impact of the quality of returned-used products on the optimal design of a manufacturing/remanufacturing system under carbon emissions constraints. **Sustainability**, v. 10, n. 9, p. 1-21, 2018.

TURUTE, A. C. D.; SILVA, R.; NERY, S. Proposta de arranjo físico em uma indústria de remanufatura de rolos de impressora. In: **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Rezende**, v. 0, n. 0, p. 1-17, 2017.

UNITED STATES INTERNATIONAL TRADE COMMISSION. **Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets, and Trade**. 2012.

VALLE, R.; SOUZA, R. G. **Logística reversa: processo a processo**. São Paulo: Atlas, 2014.

VARELA, C. A.; MEDEIROS, J. R. O lixo eletrônico de pequenos usuários: descarte e reciclagem. In: **XVI ENGEMA – Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**, 2014.

VEIGA, R. M. **Do lixo à Economia Circular: um salto possível?**. 2019. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2019.

VELTE, C. J.; SCHELLER, K.; STEINHILPER, R. Circular economy through objectives – development of a proceeding to understand and shape a circular economy using value-focused thinking. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 775-780, 2018.

VENTANA SYSTEMS (2016). *Vensim*. Versão 6.3, 2016. Disponível em <http://vensim.com/>. Acesso em: fev. 2020.

VENTURA, H. F. R. **Gestão sustentável dos resíduos sólidos: práticas na Universidade Federal da Paraíba quanto à destinação adequada dos cartuchos e toners**. 2018. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2018.

VOGTLANDER, J. G. *et al.* Combined analyses of costs, market value and eco-costs in circular business models: Eco-efficient value creation in remanufacturing. **Journal of Remanufacturing**, v. 7, n. 1, p. 1-17, 2017.

WAHAB, D. A. *et al.* A review on the applicability of remanufacturing in extending the life cycle of marine or offshore components and structures. **Ocean Engineering**, v. 169, p. 125-133, 2018.

WALTERS, J. P. *et al.* Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. **Ecological modelling**, v. 333, p. 51-65, 2016.

WANG, Y. *et al.* Impact of subsidy policies on recycling and remanufacturing using system dynamics methodology: a case of auto parts in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 74, p. 161-171, 2014.

WEI, S. *et al.* Motives and barriers of the remanufacturing industry in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 340-351, 2015.

WINANS, K.; KENDALL, A.; DENG, H. The history and current applications of the circular economy concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 825-833, 2017.

XIAO, L. *et al.* Competitive strategy in remanufacturing and the effects of government subsidy. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 26, n. 4, p. 417-432, 2017.

XU, X.; ZENG, S.; HE, Y. The influence of e-services on customer online purchasing behavior toward remanufactured products. **International Journal of Production Economics**, v. 187, p. 113-125, 2017.

YANG, S. S. *et al.* The impact of automotive product remanufacturing on environmental performance. **Procedia Cirp**, v. 29, p. 774-779, 2015.

ZHIJUN, F.; NAILING, Y. Putting a circular economy into practice in China. **Sustainability Science**, v. 2, n. 1, p. 95-101, 2007.