

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS – PPGEM

GISELE BORTOLAZ GUEDES

**MODELO HÍBRIDO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO PARA DIRECIONAR
RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO ESTABELECIMENTO DE REDES DE
SIMBIOSE INDUSTRIAL**

CURITIBA

2019

GISELE BORTOLAZ GUEDES

**MODELO HÍBRIDO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO PARA DIRECIONAR
RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO ESTABELECIMENTO DE SIMBIOSE
INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica – Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Milton Borsato.

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Guedes, Gisele Bortolaz

Modelo híbrido de apoio à tomada de decisão para direcionar resíduos sólidos industriais no estabelecimento de redes de simbiose industrial [recurso eletrônico]/ Gisele Bortolaz Guedes. -- 2019.

1 arquivo texto (139 f.): PDF; 7,68 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 04 mar. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba, 2019.

Bibliografia: p. 124-137.

1. Engenharia Mecânica e de Materiais - Dissertações. 2. Ecossistemas - Aplicações industriais. 3. Resíduos industriais. 4. Processo decisório. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Borsato, Milton, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 373

A Dissertação de Mestrado intitulada: **MODELO HÍBRIDO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO PARA DIRECIONAR RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS NO ESTABELECIMENTO DE SIMBIOSE INDUSTRIAL**, defendida em sessão pública pela candidata **Gisele Bortolaz Guedes**, no dia 09 de dezembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração: Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Milton Borsato – Presidente – UTFPR

Prof. Dr. Milton Pires Ramos – GNARUS

Prof. Dr. Tâmara Simone Van Kaick – UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Dedico esta pesquisa a Deus e
a minha amada família.

AGRADECIMENTOS

Há uma força maior que me guia em todos os dias da minha vida, é a essa presença maior, a quem chamo de Deus, o meu maior agradecimento. Agradeço por guiar meus passos nessa jornada e por me permitir viver tanto aprendizado ao longo desses últimos anos. Agradeço por toda força emanada para que eu pudesse permanecer nadando. E, por sempre me trazer de volta a superfície nos momentos em que me encontrei no fundo do oceano.

Agradeço imensamente às minhas amadas raízes, minha família. Aos meus pais, Ione e Valdenir, por acreditarem nos meus sonhos, e muitas vezes abdicarem dos seus pelos meus. Agradeço por sempre me incentivarem nesta caminhada e por tanto confiarem. Ao meu irmão ponto de luz Guilherme por estar presente, mesmo distante, me oferecendo colo e apoio para seguir adiante. Agradeço ao meu irmão Leonardo por ser minha inspiração de luta. Agradeço a minha fofinha Idacy pelas orações por minha caminhada e por compreender as minhas faltas em muitos momentos. Sou grata a minha irmã de alma Thaysa por tanto compartilhar de luz e por ser presença na minha vida. Agradeço de coração ao Thiago por ter me dado o apoio necessário no início da transformação deste sonho em realidade.

Sou imensamente grata ao meu orientador professor Borsato por me ensinar tanto sobre a educação. Agradeço pelo apoio ao longo desses últimos anos, por entender todos os meus processos e de alguma forma sempre me trazer uma palavra de incentivo para permanecer neste caminho. Agradeço de coração ao melhor programador, Caio Fabrão, que teve tanta paciência para estar ao meu lado fechando este ciclo de pesquisa.

Sou grata por cada integrante da nossa família LAMIS. Agradeço ao Seu Sato, por suas palavras de ânimo e inspiração, ao Kaio por estar sempre disposto a ouvir e ajudar, ao Rafa por todo o apoio, a Jaque por sempre me incentivar a seguir em frente, a Ana, ao Ruan, ao Ederson, e ao Lucas. Agradeço muito as mais novas integrantes do Lab, Mara, Juli e Su. E aqueles que já seguiram novos ciclos da vida, mas que de alguma forma transformaram a minha jornada, Jubs, Vitor, Luquinhas e Sérgio. Obrigada por todo o conhecimento que compartilharam comigo neste caminho de pesquisa.

E em especial, agradeço a família Figueiredo, Beth, Antônio, Carla, Ana e Antônio César, pelo carinho e abrigo. Agradeço também as amizades que são verdadeiros presentes que a vida trouxe pra mim e tornaram essa caminhada muito mais leve, Maceió, Loli, Lyng, Manda, Aninha, Polaca, Nate, Keymilee, Rotsália e Maria. Sou grata à Célia, ao Dr. Márcio, Dr. Diego,

e todos aqueles que de alguma forma fizeram parte da rede que me assistiu ao longo dessa jornada.

Tudo que aprendi ao longo desses anos, vai muito além de conhecimento científico e não há palavras para descrever. Aprendi a enfrentar meus medos, aprendi sobre equilíbrio, aprendi a confiar e continuar a nadar, e aprendi que abrir nossas vulnerabilidades é sinônimo de muita força. Compreendi que apoio é a expressão mais pura de seguir firme e viver. E eu sou imensamente grata por cada um de vocês existirem e caminharem comigo nesta trilha. Apenas agradeço por toda essa jornada. Sou grata!

Nesses tempos de céus
de cinzas e chumbos,
nós precisamos de árvores,
desesperadamente verdes.
(Mário Quintana)

RESUMO

GUEDES, GISELE BORTOLAZ. **Modelo híbrido de apoio à tomada de decisão para direcionar resíduos sólidos industriais no estabelecimento de simbiose industrial.** 2019. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A instabilidade global, reflexo do aumento da demanda por recursos naturais e da geração de resíduos industriais, é frequentemente associada aos sistemas industriais, cujos objetivos principais são o aumento da capacidade produtiva e a redução de custos. Frente a este panorama, identifica-se a necessidade de alterações no desenvolvimento de estratégias e no modo de operação das organizações com foco no desenvolvimento sustentável. Os ecossistemas industriais visam alcançar os objetivos de sustentabilidade através de relações simbióticas. Para o estabelecimento de ligações industriais simbióticas, as trocas físicas de materiais, especialmente de resíduos industriais, são extremamente importantes, pois reduzem o consumo de recursos e minimizam a geração destes resíduos. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de mecanismos e novas tecnologias capazes de apoiar a minimização dos impactos decorrentes da disposição dos resíduos industriais no meio ambiente. Neste contexto, a presente pesquisa objetiva o desenvolvimento de um modelo de apoio à tomada de decisão para direcionar os resíduos sólidos industriais no estabelecimento de simbiose industrial. Como *framework* metodológico para condução desta pesquisa foi adotado o *Design Science Research (DSR)*, centrado no objetivo da solução. O modelo desenvolvido é híbrido, pois envolve os paradigmas de modelagem para sistemas dinâmicos e complexos: baseado em agentes e dinâmica de sistemas. Para tanto, a modelagem adota uma abordagem de entradas e saídas focada no fluxo de materiais, com escopo e limite de sistema que compreendem uma perspectiva geográfica e setorial. O modelo permite a criação de três cenários, os quais estão associados à teoria de evolução de ecossistemas industriais. Além disso, permite atender o nível de simbiose entre indústrias organizadas virtualmente em uma região mais ampla. A modelagem foi demonstrada através de uma simulação para o contexto do Estado do Paraná. A ferramenta adotada na etapa de demonstração foi o *Anylogic 8*. O modelo híbrido simulado apoia à tomada de decisão ao fornecer informações referentes aos impactos econômicos e ambientais gerados por cada cenário. Assim, pretende-se com esta pesquisa colaborar tanto com a minimização da problemática ambiental, e por consequência social, ao propiciar a redução da exploração de recursos naturais, da geração de impactos ao meio ambiente e à saúde humana; quanto com a minimização dos problemas econômicos, ao racionalizar o uso de recursos, melhorar a gestão dos resíduos, apoiar a tomada de decisão e melhorar a competitividade. Ressalta-se ainda que esta pesquisa tem como intuito contribuir com a evolução do conhecimento científico no âmbito da manufatura sustentável.

Palavras-chave: Ecossistema Industrial, Simbiose Industrial, Resíduos Sólidos Industriais, Tomada de Decisão, Modelo Híbrido.

ABSTRACT

GUEDES, GISELE BORTOLAZ. **Support hybrid model for decision making to direct industrial solid waste in the establishment of industrial symbiosis.** 2019. 136p. Dissertation (Master in Mechanical and Materials Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2019.

Global instability, reflecting increased demand for natural resources, industrial waste generation and reduced human resource expenditures, is often associated with industrial systems, whose main objectives are to increase production capacity and reduce costs. This scenario identifies the need for changes in the development of strategies and in the mode of operation of organizations focused on sustainable development. Industrial ecosystems, through the symbiotic relationship of industries, aim to achieve sustainability goals. For the establishment of symbiotic industrial connections, physical exchanges of materials, especially industrial waste, are extremely important, since they reduce the consumption of resources and minimize the generation of these wastes. In this way, it is necessary to develop mechanisms and new technologies capable of supporting the minimization of the impacts arising from the disposal of industrial waste in the environment. In this context, this research aims to develop a decision support model to direct industrial solid waste in the establishment of industrial symbiosis. As methodological framework for conducting this research was adopted Design Science Research (DSR), centered on the solution goal. The developed model is hybrid because it involves the modeling paradigms for dynamic and complex systems: agent-based and system dynamics. To this end, the modeling adopts an input and output approach focused on material flow, with scope and system boundary that includes a geographical and sectoral perspective. The model allows the conception of three scenarios, which are associated with the industrial ecosystems evolution theory. Besides, it allows meeting the level of symbiosis between industries organized virtually across a wider region. A simulation was conducted to demonstrate the model in the Paraná State context. The tool adopted in the demonstration step was Anylogic 8. The simulated hybrid model supports decision making by providing information regarding the economic and environmental impacts generated by each scenario. Thus, it is intended with this research to collaborate both with the minimization of the environmental problematic, and consequently social, by providing the reduction of the exploitation of natural resources, the generation of impacts on the environment and human health; as with minimizing economic problems, by rationalizing resource use, improving waste management, supporting decision making, and improving competitiveness.

Keywords: Industrial Ecosystem, Industrial Symbiosis, Industrial Solid Waste, Decision Making, Hybrid Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conceito de desenvolvimento sustentável.	27
Figura 2 – Características da ecologia industrial.	29
Figura 3 – Níveis de operação da ecologia industrial.	30
Figura 4 – Hierarquização dos processos de gerenciamento de resíduos.	37
Figura 5 – Dados, informação, conhecimento e o valor adicionado.	42
Figura 6 – Formas de estudo de um sistema.	44
Figura 7 – Esquema geral do processo.	44
Figura 8 – Modelagem e níveis de abstração.	49
Figura 9 – Um agente típico.	52
Figura 10 – Arquitetura genérica de um modelo baseado em agente.	53
Figura 11 – Arquitetura genérica de um modelo DS.	55
Figura 12 – Cálculo lógico da DS.	56
Figura 13 – Caracterização da pesquisa.	60
Figura 14 – Framework DSR.	65
Figura 15 – Sistemas de produção industrial linear.	72
Figura 16 – Sistemas de rede industrial com conexão simbiótica indireta.	73
Figura 17 – Sistemas de rede industrial com conexão simbiótica direta.	74
Figura 18 – Modelo Conceitual de Simbiose Industrial.	76
Figura 19 – Modelo Conceitual de Simbiose Industrial.	77
Figura 20 – Fluxo de decisão do Modelo.	81
Figura 21 – Mapa do estado do Paraná e regionais IAP.	86
Figura 22 – Emissão de CO ₂ equivalente para a produção de celulose.	88
Figura 23 – Consumo de energia (fóssil e hídrica) para a produção de celulose.	88
Figura 24 – Formulação da base de dados.	92
Figura 25 – Criação do modelo de simbiose no <i>Anylogic</i>	94
Figura 26 – Tela inicial do modelo de simbiose industrial.	95
Figura 27 – Agente da indústria de manufatura.	96
Figura 28 – Agente da indústria de beneficiamento.	97
Figura 29 – Agente da unidade de valorização de resíduos.	98
Figura 30 – Agente do aterro industrial.	99
Figura 31 – Seleção dos produtos.	100
Figura 32 – Seleção das indústrias.	101
Figura 33 – Seleção do fornecedor.	102
Figura 34 – Seleção do direcionamento de RSI.	103
Figura 35 – Funções, variáveis e parâmetros.	104
Figura 36 – Movimentação dos caminhões.	104
Figura 37 – Lucro do sistema.	106
Figura 38 – Simulação Cenário 1 para 5 anos.	107
Figura 39 – Simulação Cenário 1 para 5 anos.	108

Figura 40 – Simulação Cenário 2 para 5 anos.....	109
Figura 41 – Simulação Cenário 2 para 5 anos.....	110
Figura 42 – Simulação Cenário 3 para 5 anos.....	111
Figura 43 – Simulação Cenário 3 para 5 anos.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem.....	33
Quadro 2 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade.....	34
Quadro 3 – Concepções filosóficas.	58
Quadro 4 – Artefatos da DSR.....	63
Quadro 5 – DSR, objetivos específicos, atividades e entregas.....	66
Quadro 6 – Questões e respostas iniciais para construção do modelo.	69
Quadro 7 – Cenários de simulação do modelo.	70
Quadro 8 – Agentes do modelo proposto.	79
Quadro 9 – Critérios e prioridades.	83
Quadro 10 – Nota de qualidade dos produtos.....	84
Quadro 11 – Emissão de CO ₂ e consumo de energia.	89
Quadro 12 – Preços dos produtos.	91
Quadro 13 – Taxa de reciclagem de produtos.	91
Quadro 14 – Componentes de indicadores do sistema.	105
Quadro 15 – Dados de saída da simulação para 5 anos.....	113
Quadro 16 – Dados de saída da simulação para 10 anos.....	115
Quadro 17 – Dados de saída da simulação para 20 anos.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Utilização industrial do Paraná.....	90
---	----

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNAE	Classificação Nacional de Atividade Econômica
CNI	Confederação Nacional das Indústrias
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DS	Dinâmica de Sistemas
DSR	<i>Design Science Research</i>
EI	Ecologia Industrial
FIEP	Federação das Indústrias do Estado do Paraná
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada
IPCC	Instituto Pró-Cidadania
MBA	Modelagem Baseada em Agentes
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PERS PR	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<i>ProKnow-C</i>	<i>Knowledge Development Process-Constructivist</i>
RSI	Resíduos Sólidos Industriais
SI	Simbiose Industrial
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
UVR	Unidade de Valorização de Resíduos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.1.2	<i>Objetivo geral</i>	22
1.1.3	<i>Objetivos específicos</i>	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	23
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	26
2.2	ECOLOGIA INDUSTRIAL	28
2.2.1	<i>Simbiose Industrial</i>	31
2.3	RESÍDUOS SÓLIDOS	32
2.3.1	<i>Resíduos Sólidos Industriais (RSI)</i>	34
2.4	PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO	38
2.4.1	<i>Elementos da tomada de decisão</i>	41
2.5	MODELAGEM DE SISTEMAS	42
2.6	MODELO DE SIMULAÇÃO	45
2.7	MODELAGEM BASEADA EM AGENTES (MBA)	49
2.8	DINÂMICA DE SISTEMAS (DS).....	53
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS	57
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	57
3.1.1	<i>Concepção filosófica</i>	57
3.1.2	<i>Método de pesquisa</i>	58
3.1.3	<i>Estratégia de pesquisa</i>	59
3.2	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO.....	67
4.2	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO	67
4.3	PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO	68
4.4	DEMONSTRAÇÃO.....	85
4.5	AVALIAÇÃO	117
5	CONCLUSÃO	120
	REFERÊNCIAS	133

ANEXO	133
--------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção industrial, cujos objetivos principais envolvem o aumento da capacidade produtiva e a redução de custos, resultam essencialmente no aumento da demanda por recursos naturais, no acúmulo de resíduos industriais, e por efeito, na geração de problemas ambientais e sociais.

De acordo com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, iniciativa da Organização das Nações Unidas (ONU), que apresenta um plano de medidas transformadoras para a construção de uma sociedade justa, sustentável e pacífica:

[...] Governos, organizações internacionais, setor empresarial e outros atores não estatais e indivíduos devem contribuir para a mudança de consumo e produção não sustentáveis, inclusive via mobilização, de todas as fontes, de assistência financeira e técnica para fortalecer as capacidades científicas, tecnológicas e de inovação dos países em desenvolvimento para avançar rumo a padrões mais sustentáveis de consumo e produção (ONU, 2016, p. 10).

A mudança de postura da sociedade diante das consequências negativas dos padrões dominantes de consumo e produção, a acirrada competitividade, as evoluções tecnológicas, a legislação e a conscientização motivam as organizações à adaptação e à inovação. Segundo Demajorovic (2013), o desenvolvimento de uma legislação ambiental cada vez mais rigorosa, a expansão dos chamados consumidores verdes e o aumento dos custos pela utilização de recursos naturais propiciaram uma reformulação da visão empresarial.

A gestão organizacional encara de forma distinta as estratégias de desenvolvimento, focada na elaboração de novas alternativas que garantam ao longo da cadeia produtiva industrial o bem-estar social, econômico e ambiental. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2012), as negociações como usualmente conhecidas não podem ser mais consideradas como uma opção, sendo necessária uma abordagem mais holística para resolver os desafios que são altamente interdependentes.

Esta nova abordagem pode ser adotada através da inclusão do desenvolvimento sustentável nos sistemas, que de acordo com o Relatório de *Brundtland*, publicado pela Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, nomeada pela ONU, é conceituado como “aquele que permite satisfazer as necessidades de gerações atuais sem comprometer a possibilidade de as futuras gerações satisfazerem as suas” (WCED, 1987, p. 16). O conceito é caracterizado principalmente pela geração de mais valor com a menor quantidade de impactos ao ambiente em que se insere (WBCSD, 2000).

Dentro da cadeia produtiva industrial, a cadeia de suprimentos viabiliza a continuidade de produção, pois é uma rede de organizações conectadas e interdependentes e que trabalham cooperativamente juntas para controlar, gerenciar e melhorar o fluxo de materiais e informações do fornecedor até os usuários finais (CHRISTOPHER, 2007).

A gestão da cadeia de suprimentos é altamente relevante, tanto para competir com sucesso no mercado, quanto para assegurar um comportamento responsável em todas as fases da cadeia de abastecimento, representando uma área potencialmente importante para estabelecer a forma de integrar considerações e práticas ambientais e sociais, alcançando assim a meta da sustentabilidade (ASHBY, 2012). É necessário implementar na gestão da cadeia de suprimentos práticas que não apenas promovam as empresas e o desempenho das cadeias mas que também enfoquem nas questões sociais, econômicas e ambientais (ALZAMAN, 2014; AMIN; ZHANG, 2014; BESKE, 2012). A sustentabilidade pode ser alcançada através do desenvolvimento de novas tecnologias, novos processos de produção, novos materiais, procedimentos e práticas gerenciais que reduzam os efeitos negativos do ciclo do produto (BARBOSA, 2001).

A ecologia industrial, uma abordagem relativamente nova, agrega ferramentas e estratégias para viabilizar a atuação do sistema industrial frente às limitações ecológicas de nosso ecossistema. A abordagem estuda formas de utilização conjunta de recursos naturais, reciclagem de resíduos, e reutilização de insumos por meio da construção de redes industriais que permitam uma economia dos recursos naturais combinada com um melhor aproveitamento dos insumos e dos resíduos industriais, visando à preservação do ecossistema, e uma otimização do processo industrial, assim atendendo ao conceito de desenvolvimento sustentável (WHITE, 1994).

O objetivo é reduzir o consumo de recursos e produção de resíduos pela ligação simbiótica das indústrias, para possibilitar que a energia e os resíduos materiais de uma empresa possam ser utilizados como matérias-primas por outras empresas (DUNN; STEINNEMAN, 1998). A simbiose industrial é parte integrante desta nova abordagem (CHERTOW; PARK, 2011) na qual as indústrias passam a ser consideradas como parte da biosfera, o que só é possível interferindo diretamente na cadeia produtiva e melhorando o ciclo dos materiais, desde a extração da matéria prima até a disposição final.

Neste contexto, a simbiose industrial contribui, ao unir setores tradicionalmente separados, através das trocas físicas de materiais que são extremamente importantes, sendo que seu maior foco está no fechamento dos ciclos de materiais, usando resíduos de uma instalação como uma entrada alternativa para outra instalação (BERKEL et. al., 2008).

Com o crescimento na geração dos resíduos, torna-se necessário o desenvolvimento de mecanismos para promover a conscientização e a busca por novas tecnologias capazes de apoiar a minimização dos impactos decorrentes da disposição destes no meio ambiente, reduzindo os custos envolvidos nesta atividade (ZURBRÜGG et al., 2012). Nos últimos anos o governo tem desenvolvido novas legislações e outros instrumentos legais, a exemplo, as instruções normativas voltadas ao gerenciamento de resíduos sólidos, passando a orientar e fiscalizar as indústrias à adequação e às exigências legais. Por outro lado, além do atendimento às questões legais, muitas indústrias optam em adotar estratégias ambientais ligadas aos seus processos, produtos e serviços com o objetivo de prevenir e minimizar a geração de resíduos e de transformar a crise ambiental em uma vantagem competitiva. Outra estratégia que tem sido adotada é a negociação de resíduos entre indústrias de diferentes segmentos ou não, como matéria-prima (OLIVEIRA, 2011).

Uma das iniciativas de negociação de resíduos industriais são as chamadas bolsas de resíduos que são ambientes na internet em que é possível realizar a compra, a venda, a troca ou a doação de sobras de processos industriais (IPEA, 2012). No entanto, Oliveira (2006) destaca a dificuldade de atender os padrões requeridos para os resíduos anunciados, pois muitos não têm a classificação correta e a composição química não é conhecida, por serem gerados em processos que apresentam variações. Como resultados, a maior parte dos resíduos com composições diferentes dificulta sua utilização como matéria-prima. Outro problema que resulta no desuso da bolsa é a desconfiança das empresas de que as informações dos resíduos anunciados serão utilizadas pelos órgãos ambientais para imposição de penalidades (ARCHANJO, 2008).

Segundo Mouzon, Yildirim e Twomey (2007), a gestão de resíduos com o intuito de melhorar a manufatura é uma área crescente de investigação que contribui para o domínio da produção sustentável e eficiência energética, e recentemente para o campo da economia circular.

Na gestão da cadeia de suprimentos, embora seja crescente o interesse de pesquisas em relação às questões socioambientais, o foco em logística reversa prevalece, sendo a dimensão ambiental mais visível tanto para acadêmicos como práticos no assunto. Outras temáticas aparecem de forma limitada, pontual e estreita (MANN et. al, 2010). A atenção dada ao circuito fechado, ao conceito “verde” e à sustentabilidade em cadeias de suprimento ainda é relativamente esparsa e dispersa (MANN et. al, 2010; SRIVASTAVA, 2007).

Esta pesquisa iniciou com uma investigação na Unidade de Valorização de Resíduos (UVR), até então situada na cidade de Campo Magro (PR), administrada pelo antigo Instituto

Pró-Cidadania (IPCC) em parceria com a Prefeitura de Curitiba. A UVR se tornou modelo internacional na gestão de resíduos recicláveis, processando em média 10 mil toneladas de resíduos por ano. Os resultados da comercialização dos recicláveis financiava projetos sociais desenvolvidos pelo IPCC e pela Fundação de Ação Social. Na usina os resíduos eram triados, classificados, enfiados e comercializados. Mediante alterações de cenário político e financeiro, o IPCC encerrou suas atividades em meados de 2017 e, por consequência, a UVR. A partir desta mudança de cenário, os resíduos que até então eram processados para reutilização passaram a ser encaminhados para aterro sanitário.

Desta forma, esta pesquisa foi conduzida com o intuito de servir como apoio e respaldo científico no desenvolvimento de iniciativas como a UVR. A fim de explorar o conhecimento e posicionar-se diante da literatura sobre mapeamento de fluxo de materiais e ecossistemas industriais, inicialmente foi realizada uma revisão estruturada da literatura. Assim, foi possível definir a problemática a ser abordada nesta pesquisa. De maneira geral estudos apontam: (i) a necessidade de apoio à gestão de resíduos provenientes das atividades industriais, (ii) a necessidade de estratégias que melhorem a eficiência de recursos em termos econômicos e ambientais, (iii) a dificuldade de desdobrar conceitos de sustentabilidade ao nível operacional, e (iv) a escassez de ferramentas práticas para apoiar melhorias nos fluxos de materiais em sistemas complexos.

Os materiais são recursos de importância primária, contribuindo significativamente para custos econômicos e impactos ambientais da produção (GOULD et al., 2016). A fim de solucionar os problemas de eficiência de recursos, ao nível econômico e ambiental, estudos recentes desenvolveram pesquisas focadas em fluxo de material (CALVO, VALERO, VALERO, 2016; EDTMAYR, SUNK, SIHN, 2016; FRÖHLING et al., 2013; GOULD et al., 2016; KHATTAK et al., 2016; PARK et al., 2011). Há uma necessidade crescente de conceitos sustentáveis economicamente e estratégias para o funcionamento, tais como a melhoria da eficiência dos recursos e do uso de energia (FRÖHLING et al., 2013).

Os resíduos provenientes das atividades industriais são amplamente apontados como uma problemática e revelam a necessidade de apoio à sua gestão (ALLESCH; BRUNNER, 2015; ARENA; DI GREGORIO, 2014; BAI, 2015; KUCZENSKI et al., 2010; LENZEN; REYNOLDS, 2014; MATHIEUX; BRISSAUD, 2010; NAKAMURA et al., 2014; RYBICKA et al., 2015; SMITH et al., 2015; STANISAVLJEVIC; BRUNNER, 2014; TALENS PEIRO et al., 2013). Segundo Smith et al. (2015) o uso de resíduos descartados como alternativa de matéria-prima demanda a identificação dos materiais considerados e as operações usadas para

gerenciá-los. É essencial identificar os fluxos e estoques por meio de um sistema de gestão de resíduos para avaliar o desempenho (ALLESCH; BRUNNER, 2015).

Quanto à aplicação da sustentabilidade ao nível operacional, há inúmeros conceitos definidos para abordar a temática de sustentabilidade que podem contribuir para a manufatura sustentável (DESPEISSE; OATES; BALL, 2013). No entanto, a forma como tais conceitos são desdobrados ao nível operacional ainda é um problema encontrado na literatura (DESPEISSE et al., 2012a,b; DESPEISSE et al., 2013; KURDVE et al., 2015; SMITH; BALL, 2012). De acordo com Despeisse et al. (2013), a literatura e os estudos de caso não apresentam a forma de identificar as melhorias para operações de manufatura mais sustentáveis e os fluxos de recursos de uma perspectiva do fabricante. Quanto aos exemplos práticos, estes são em grande parte específicos do contexto e referem-se a situações problemáticas específicas. Assim, é difícil replicar tais melhorias em outros contextos. Sob este enfoque, Despeisse et al. (2012b) revela que há na literatura uma lacuna na aplicação da ecologia industrial ao nível de fábrica.

Conforme mencionam Despeisse et al. (2013), apesar de existirem ferramentas de tecnologia da informação que apoiam melhorias nas análises de fluxo de materiais em sistemas complexos, essas ferramentas não são uma abordagem prática, e não abrangem intermitência de processos e dimensões espaciais. Desta forma, identifica-se a necessidade de criação de ferramentas de apoio automatizadas que apoiem a continuidade da gestão (MATHIEUX; BRISSAUD, 2010), assim como possam apoiar a modelagem e avaliação (SMITH; BALL, 2012).

Nos modelos simbólicos há falta de detalhes, pouca ou nenhuma medida quantitativa ou descrição dos elementos do sistema, atividades e relacionamentos, e incapacidade de captar a dinâmica envolvida. Os modelos analíticos, tais como fórmulas matemáticas, fórmulas de filas e programação linear, incluem premissas que muitas vezes são incapazes de explicar comportamentos aleatórios simplificados e as simulações de fábrica, por sua vez, são modelos de difícil construção (PAJU et al., 2010).

No entanto, é fundamental a adoção de uma abordagem abrangente, sistêmica, orientada para objetivos com base no conhecimento profundo do comportamento do sistema e capaz de fornecer informações confiáveis sobre como riscos ambientais podem ser minimizados e recursos potenciais maximizados (ARENA; DI GREGORIO, 2014).

Diante deste contexto, esta pesquisa é construída a partir das seguintes indagações:

- 1) Como representar a dinâmica de fluxo de materiais nas indústrias para apoiar gestores na tomada de decisão quanto ao direcionamento de resíduos sólidos industriais, promovendo a eficiência de recursos, em termos econômicos e ambientais?

- 2) Quais transformações ocorrem em um sistema ao se desenvolver uma rede industrial em simbiose? Como as informações provenientes do sistema podem apoiar práticas de simbiose industrial?

Para a presente pesquisa considera-se que a modelagem de sistemas é a estrutura que possibilita alcançar a solução da problemática apontada. A partir da definição da estrutura, o conhecimento foi aprofundado por meio de uma avaliação da modelagem de sistemas em ambientes de simbiose industrial. Para tanto, uma nova revisão estruturada da literatura foi desenvolvida para apoiar a construção do modelo aqui proposto.

A relevância desta pesquisa está em desenvolver um modelo genérico e representativo das interações dinâmicas de materiais entre indústrias, focado nas trocas dos resíduos sólidos industriais, para apoiar de forma prática a criação de relações de simbiose industrial. Assim, ao direcionar a destinação dos resíduos sólidos industriais para a reutilização, através da reinserção destes resíduos na cadeia produtiva como matéria-prima, estende-se o ciclo de vida dos produtos.

A adoção de resíduos industriais como insumos para outros processos possibilita progredir para o alcance dos objetivos de sustentabilidade. Desta forma, o presente estudo pretende colaborar com a minimização da problemática ambiental, ao propiciar a redução da exploração de recursos naturais, da geração de impactos ao meio ambiente e à saúde humana, bem como a minimização dos problemas econômicos, ao racionalizar o uso de recursos, melhorar a gestão dos resíduos, apoiar a tomada de decisão e melhorar a competitividade, uma vez que atende aos novos requisitos do mercado. Possui ainda o intuito de contribuir com a evolução do conhecimento científico no âmbito da manufatura sustentável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é desenvolver um modelo das interações entre fluxos de materiais que permita avaliar alterações dinâmicas para apoiar à tomada de decisão quanto ao direcionamento de resíduos sólidos industriais a fim de estabelecer redes de simbiose industrial.

1.1.3 Objetivos específicos

Com intuito de atender o objetivo geral, foram definidos alguns objetivos específicos para este estudo, listados a seguir:

- a) Realizar um levantamento sobre conceitos envolvidos na temática de pesquisa para fundamentação teórica;
- b) Analisar a literatura de forma estruturada, abordando mapeamento de fluxo de materiais e ecossistemas industriais para identificação do estado da arte e das oportunidades de pesquisa;
- c) Avaliar a modelagem de sistemas em ambientes de simbiose industrial;
- d) Explorar práticas industriais para o estabelecimento de simbiose industrial com enfoque em resíduos sólidos industriais através de análise crítica para estruturação do modelo;
- e) Construir o modelo com base no *framework* metodológico *Design Science Research* (DSR) e nas informações exploradas sobre sistemas de simbiose industrial e resíduos sólidos industriais;
- f) Implementar o modelo desenvolvido em um contexto industrial para demonstração de sua aplicabilidade;
- g) Avaliar o modelo desenvolvido através da construção de cenários e simulação.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a pesquisa “Retratos da sociedade: Meio Ambiente”, elaborada pela Confederação Nacional das Indústrias (CNI) (2012), revela-se que 13% dos cidadãos associam as emissões de fumaça e resíduos provenientes das indústrias, como sendo principais responsáveis pela poluição do meio ambiente, outros 22% dos participantes responsabilizam a fumaça e a emissão de gases dos veículos.

Em outra pesquisa realizada pelo Serviço de Acompanhamento da Opinião Pública do Senado (Datenado) (2012), aponta-se que 91% dos cidadãos brasileiros preferem comprar um produto de uma empresa que respeita o meio ambiente, ainda que seja mais cara. Além disso, 54% dos consumidores procuram saber como a empresa se relaciona com o meio ambiente e com seus colaboradores, e a mesma porcentagem costuma verificar se o produto é reciclado.

Há uma crescente demanda pela elaboração de modelos de gestão que priorizem o desenvolvimento sustentável. Atualmente a maior parte do valor de mercado de uma empresa está associada a bens intangíveis, tais como reputação e capacidade de adaptação às expectativas da sociedade. No futuro a capacidade de inovação e crescimento de uma empresa estará dependente da forma como contribui para a resolução dos desafios do desenvolvimento sustentável (WBCSD, 2000).

As empresas não podem mais conduzir processos que viabilizam somente o produto final, desprezando todo o conjunto de fatores, como subprodutos, balanço energético e impacto ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores, sob pena de, com certeza, sucumbirem devido à sua insustentabilidade (JACOBI, 2006). No longo prazo, geram-se múltiplos tipos de ônus para as organizações, como aumento de custos, redução de lucros devido ao uso ineficiente dos recursos, perda da posição no mercado ou a cessação das suas atividades (OLIVEIRA; BORGES; JABBOUR, 2005).

Especificamente em relação ao acúmulo de resíduos industriais dentro de um parque industrial, podem-se originar graves danos ambientais sem a gestão devida, bem como um número crescente de problemas de segurança e aumento dos custos com cuidados de saúde (JIN et al., 2009). A gestão adequada dos resíduos sólidos é um grande desafio para os parques industriais devido à grande quantidade e variedade de resíduos gerados nesses locais. Uma medida importante diz respeito à reutilização sistemática de resíduos e subprodutos, o que minimiza a extração de recursos naturais e o esgotamento ambiental (ERKMAN, 1997).

No Brasil, a Lei n.º 12.305/2010, institui-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotadas no país, visando à gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, e prevê obrigações ao setor produtivo (BRASIL, 2010).

Em nível global, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2016, p. 34) apresenta dentro do objetivo 12, que busca assegurar padrões de produção e consumo sustentáveis, a meta de até 2030 reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.

Percebe-se que as mudanças no direcionamento das indústrias quanto às questões de sustentabilidade são inevitáveis. Apesar da lentidão envolvida neste processo de transformação, já é possível perceber iniciativas para este fim, tais como as barreiras tarifárias, sistemas de gestão ambiental (SGA), programas de produção mais limpa, certificações de qualidade e meio ambiente e bolsa de resíduos.

O desenvolvimento de pesquisas envolvendo a temática de ecologia industrial, e mais especificamente sobre a simbiose industrial, coopera para o alcance dos objetivos de sustentabilidade. E, a criação de modelos representativos das dinâmicas de fluxo de materiais é uma alternativa para apoiar práticas de simbiose industrial.

Modelar e simular um ecossistema industrial baseado na estratégia de simbiose é um desafio. A estrutura deste sistema complexo é sofisticada e contém um grande número de componentes e processos que interagem com frequência (MENG; WEN; QIAN, 2018). Diante deste desafio, métodos inovadores de modelagem e simulação podem aumentar a percepção e o entendimento da complexidade intrínseca relacionada às estratégias transformadoras da sustentabilidade industrial (DEMATINI; BERTANI; TONELLI, 2019).

O modelo de simbiose industrial desenvolvido por esta pesquisa contribui com esta transformação por permitir a avaliação da dinâmica do fluxo de material e abordar os principais recursos da rede de simbiose industrial. A abordagem é abrangente, representativa do comportamento do sistema e orientada para o objetivo de apoiar a tomada de decisão de gestores quanto às alternativas de conexões industriais. Por meio da simulação do modelo proposto é possível, então, oferecer suporte no processo decisório e torná-lo mais coerente e robusto.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está estruturada em cinco capítulos. O capítulo inicial apresenta de forma introdutória o contexto em que está inserida, os objetivos geral e específico, assim como a justificativa para a sua elaboração. No capítulo dois são apresentados os principais conceitos envolvidos pela temática deste estudo, abordando temas de manufatura sustentável e tomada de decisão. O capítulo três trata especificamente dos aspectos metodológicos da pesquisa, através da caracterização e da descrição do procedimento metodológico adotado. No capítulo seguinte são apresentados os resultados e a discussão, com enfoque no projeto e desenvolvimento do modelo, na demonstração e na avaliação. Por fim, o capítulo cinco como forma de conclusão expõe as considerações finais sobre a realização desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diante da contextualização e da definição dos objetivos desta pesquisa, este capítulo apresenta os principais conceitos referentes à manufatura sustentável e à tomada de decisão. Para abordar a manufatura sustentável são explorados os conceitos de desenvolvimento sustentável, ecologia industrial e resíduos sólidos. E, para abordar a temática de tomada de decisão são apresentados os conceitos envolvidos no processo de tomada de decisão e na modelagem de sistemas.

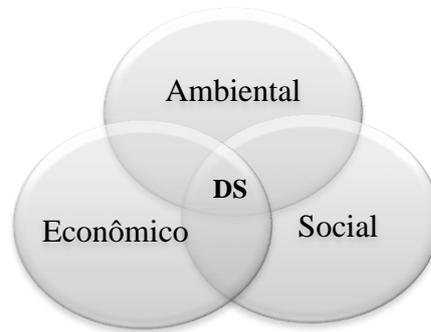
2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O termo desenvolvimento sustentável obteve relevância internacional após a publicação do Relatório de *Brundtland*, elaborado pela Comissão das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987. Segundo este documento, o conceito refere-se ao desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras (WCED, 1987, p. 43).

No entanto a demonstração de interesse pelo tema de sustentabilidade surgiu antes, no ano de 1972, também através das Nações Unidas, com a realização do primeiro grande evento mundial sobre o meio ambiente, denominado Conferência de Estocolmo. Particularmente, desde o acontecimento da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, no ano de 1992, realizada no Rio de Janeiro este tema tem se mostrado de crescente interesse mundial. O evento, conhecido também como Cimeira da Terra ou Eco-92, consagrou o tema de desenvolvimento sustentável, servindo para divulgação pública do tema além de disponibilizar documentos importantes, assinados pelos representantes dos mais de cem países envolvidos na conferência, evidenciando a conscientização mundial.

Ao longo dos anos, inúmeras definições para o desenvolvimento sustentável surgiram, contudo têm-se mantido similares à definida pela Comissão de *Brundtland* (GLAVIC; LUKMAN, 2007). O conceito de desenvolvimento sustentável é intrínseco a três pilares básicos: o meio ambiente, a sociedade e a economia (Figura 1). Segundo McKeown (2002), o desenvolvimento destas três áreas deve ser entendido como um todo e não em separado.

Figura 1 – Conceito de desenvolvimento sustentável.



Fonte: Oliveira (2013).

Para Glavic e Lukman (2007), o desenvolvimento sustentável enfatiza a evolução da sociedade de uma forma responsável do ponto de vista econômico, em harmonia com o ambiente e processos ambientais. As limitações econômicas, sociais e ambientais são consideradas de forma a contribuir no bem-estar presente e futuro da sociedade. Assim, a fim de alcançar o desenvolvimento sustentável, devem ocorrer mudanças nos processos produtivos, e de fato já estão começando a acontecer.

Segundo a Comissão Européia (2003), as duas últimas décadas de consciência ambiental consistiram essencialmente em soluções de fim de linha, isto é, reduzir a quantidade de substâncias e emissões perigosas após o processo de produção. No entanto, de acordo com Jayachandran et al. (2006), atitudes proativas de algumas empresas mudaram o foco de atuação através de medidas de controle das emissões para a sua eliminação ou prevenção na fonte. Empresas que adotaram este comportamento integram os aspectos ambientais em todas as fases do negócio, com o objetivo principal de zerar a geração de resíduos.

A sustentabilidade em uma empresa gera valor para os seus acionistas e a sociedade através do conceito de “tríplice resultado”, proposto por John Elkington, que mostra como torná-la mais lucrativa. O seu sucesso deve ser medido não somente pelo desempenho financeiro, mas também pela sociedade e meio ambiente, formando o tripé da performance ou também conhecido como tripé da sustentabilidade (*triple bottom line*) (DIAS, 2011; SAVITZ; WEBER, 2007). Desta forma, o desenvolvimento sustentável, ao contrário da visão instalada de desagregação dos benefícios econômicos, deve ser visto como fonte de oportunidade de negócios, sendo considerado um importante meio de ganho de competitividade empresarial.

2.2 ECOLOGIA INDUSTRIAL

Para solucionar os desafios de sustentabilidade na manufatura há várias ferramentas e abordagens que avaliam e gerenciam o impacto ambiental das atividades industriais e, por sua vez, apoiam a integração de conceitos de sustentabilidade na prática corporativa, sendo a ecologia industrial (EI) uma das perspectivas propostas (DESPEISSE et al., 2012b). Deutz (2009, p. 276) menciona que a ecologia industrial “compreende teoria e prática para a implementação do desenvolvimento sustentável”.

O termo ecologia industrial foi introduzido por Frosch e Gallopoulos (1989), através da denominação de ecossistema industrial, no qual o consumo de energia e materiais é otimizado, bem como os impactos ambientais são minimizados com o aproveitamento dos resíduos de um processo como matéria-prima para outro processo.

De acordo com White (1994):

Esta abordagem pode ser definida como o estudo dos fluxos de materiais e de energia nas atividades industriais e de consumo, dos efeitos desses fluxos sobre o meio ambiente, e as influências de fatores econômicos, políticos, regulatórios e sociais sobre o fluxo, uso e transformação de recursos (WHITE, 1994, p. 5).

Nesta abordagem orienta-se a transformação do sistema industrial numa base sustentável, envolvendo uma profunda mudança de um modelo linear para um modelo de circuito fechado que se assemelha aos fluxos cíclicos dos ecossistemas (LOWE; EVANS, 1995). Desta forma, um sistema industrial não deve ser visto isoladamente de seus sistemas circundantes, mas em conjunto com eles, otimizando o ciclo total de materiais a partir do material virgem para o material final, até a sua disposição final (GRAEDEL; ALLENBY, 1995). Assim, a EI oferece uma visão holística que considera, em conjunto e de modo amplo, as necessidades da natureza e dos homens, não apenas as econômicas, mas também as sociais (ISENMANN, 2003).

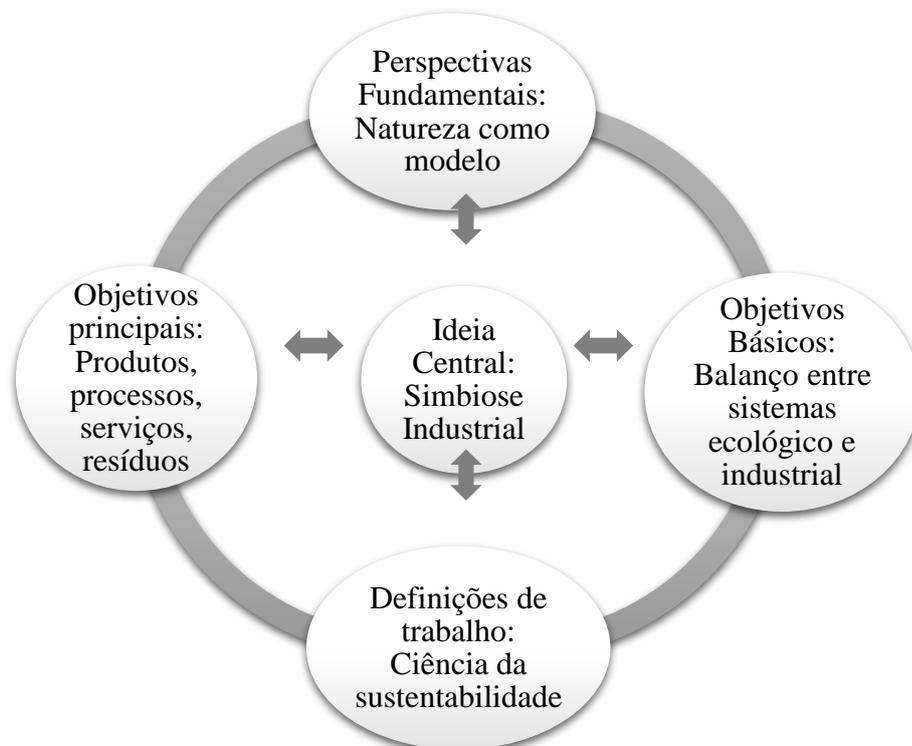
Despeisse et al. (2012b) salientam que uma das propriedades fundamentais da EI é a integração dos vários componentes de um sistema para reduzir: (a) a entrada de recursos; (b) a geração de poluentes; e, (c) as saídas de resíduos.

Há três modelos de EI comumente referenciados na literatura: lineares, quase cíclicos e cíclicos (GRAEDEL, 1994). Estes modelos representam três níveis diferentes de impacto ambiental das trocas de recursos. O modelo linear considera que um sistema industrial tem uma forte dependência dos sistemas naturais de recursos, sendo que sob este modelo as trocas de

recursos possuem o maior impacto negativo sobre o meio ambiente. O modelo quase cíclico apresenta um certo grau de recursos circulando em um sistema industrial, assim reduz o uso de recursos externos e a produção de resíduos, minimizando os impactos negativos sobre o ambiente devido ao intercâmbio de recursos entre organizações. Já o modelo cíclico consiste na circulação fechada de uso e troca de recursos dentro de um sistema industrial, em que a única entrada para sustentar o sistema é a energia. Desta forma, representa o objetivo maior da EI, a circulação fechada de recursos de um sistema industrial e o impacto zero no meio ambiente (CHERTOW, 2000).

De acordo com Isenmann (2003), a ecologia industrial é constituída por cinco características principais: (a) perspectiva fundamental da natureza como modelo; (b) objetivo básico de balancear os sistemas ecológicos e industriais; (c) definição como ciência da sustentabilidade; (d) objetivos principais focados em produtos, processos e serviços; e (e) ideia principal de simbiose industrial. A integração destas características pode ser identificada na Figura 2.

Figura 2 – Características da ecologia industrial.



Fonte: Isenmann (2003).

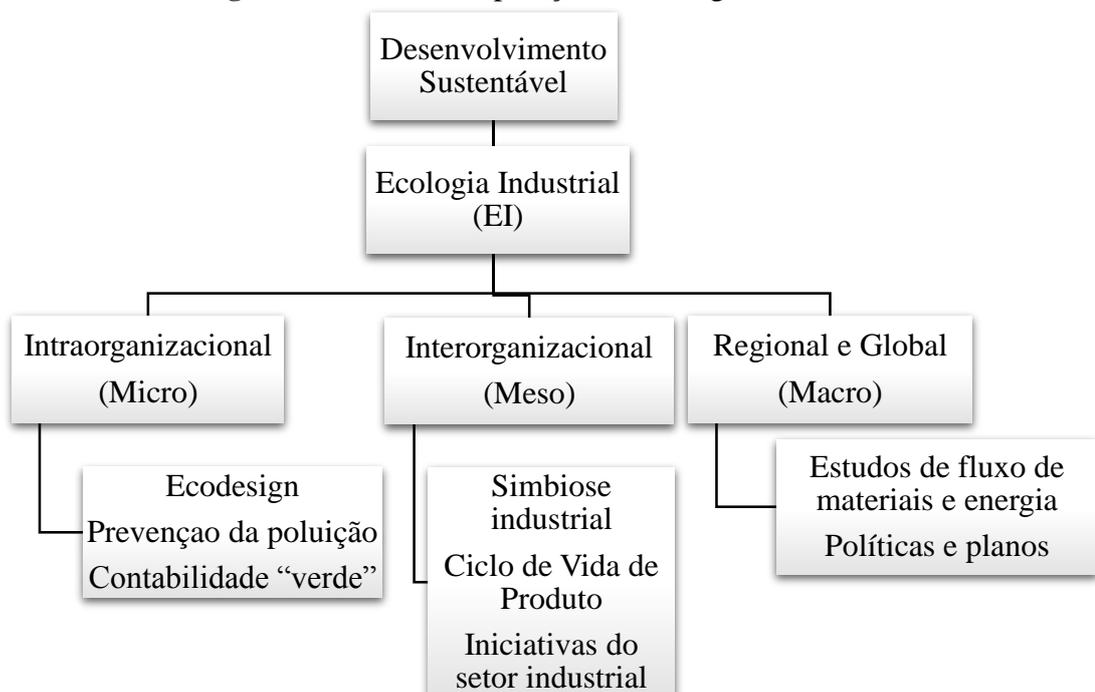
De acordo com Chertow (2000), a EI permite abordar três diferentes níveis de operação, sendo o foco de atuação: (a) ao nível intraorganizacional, (b) ao nível interorganizacional, e (c)

ao nível regional ou global. O primeiro nível refere-se às atividades desenvolvidas internamente na organização, como o ecodesign, prevenção da poluição e contabilidade “verde”. O segundo nível aborda iniciativas interfirmas, como simbiose industrial, o ciclo de vida do produto e outras iniciativas do setor industrial. O último nível relaciona-se à abordagem regional e global que envolve, por exemplo, estudos de fluxo de materiais e energia e políticas e planos de desenvolvimento (Figura 3).

Segundo Erkman (1997), a partir da perspectiva de ecologia industrial há desafios práticos a serem enfrentados como:

- Recuperação sistemática de resíduos: as redes de utilização de recursos e de resíduos devem ser criadas em ecossistemas industriais, de modo que toda a matéria residual se torne um recurso para outra empresa ou outro agente econômico;
- Minimização do desperdício;
- Desmaterialização da economia: trata-se de minimizar o fluxo total de material, garantindo ao mesmo tempo serviços pelo menos equivalentes. O progresso técnico permite que mais serviços sejam produzidos com menos material;
- Descarbonização da energia: o consumo de hidrocarbonetos deve ser menos prejudicial e incentivar a transição para fontes de energia menos ricas em carbono fóssil.

Figura 3 – Níveis de operação da ecologia industrial.



Fonte: adaptado de Chertow (2000).

Desta forma, percebe-se que a adoção da abordagem de EI pode ser fonte de vantagem competitiva, permitindo que eventuais resíduos se tornem subprodutos comercializáveis, dada à necessidade de aumento de eficiência na utilização de energia e materiais e na eliminação de perdas (ERKMAN, 1997).

2.2.1 Simbiose Industrial

A Simbiose Industrial (SI) é uma abordagem derivada da Ecologia Industrial (CHERTOW; PARK, 2011), na qual as indústrias passam a ser consideradas como parte da biosfera, sendo esta consideração possível apenas com a interferência diretamente na cadeia produtiva e melhorando o ciclo dos materiais, desde a extração da matéria prima até a disposição final. O termo simbiose baseia-se na noção das relações simbióticas biológicas da natureza em que pelo menos duas espécies não relacionadas entre si trocam materiais, energia, ou informação de forma mutuamente benéfica (CHERTOW, 2000).

De acordo com Lombardi e Laybourn (2012), a SI envolve organizações diversas unidas através de uma rede visando promover inovação ecológica e mudança cultural a longo prazo. A criação e o compartilhamento de conhecimento através da rede geram transações mutuamente rentáveis para o fornecimento de insumos necessários, destinações finais que agreguem valor aos subprodutos, melhorias empresariais e melhorias nos processos técnicos. Sob esta perspectiva, para Chertow (2000), a SI ocorre na interfirma porque inclui opções de troca entre várias organizações.

De acordo com Chertow (2007):

A simbiose industrial engaja setores tradicionalmente separados em uma abordagem coletiva para vantagem competitiva envolvendo trocas físicas de materiais, energia, água e/ou subprodutos. As chaves para a simbiose industrial são a colaboração e as possibilidades sinérgicas oferecidas pela proximidade geográfica (CHERTOW 2007, p. 12).

As trocas físicas de materiais são extremamente importantes dentro do conceito de SI. Seu maior foco está no fechamento dos ciclos de materiais, usando resíduos de uma instalação como uma entrada alternativa para outra instalação (BERKEL et al., 2008). No entanto, além de trocas físicas de materiais, a simbiose industrial abrange a troca de informação e melhora a articulação entre as empresas envolvidas, promovendo assim uma mudança de cultura organizacional, tornando-as mais abertas para novas oportunidades e mais eficientes (ASHTON, 2008).

O crescimento econômico e o social, bem como as respectivas oportunidades tecnológicas, são propagados pela cooperação que pode ser identificada na SI (CHERTOW; EHRENFELD, 2012). Além disso, Wang, Feng e Chu (2013) afirmam que é viável reduzir o desperdício e a poluição por meio do compartilhamento de: materiais, água, energia, informações e experiências.

A SI se concentra na inovação e criação de redes de compartilhamento de conhecimento para melhorar a eficiência do uso de materiais e energia, que está além do desperdício e de trocas de subprodutos (LOMBARDI; LAYBOURN, 2012).

A SI tem sido considerada como uma das soluções eficazes para reduzir o impacto das emissões de resíduos e do consumo de insumos primários em direção a modelos de produção sustentável (YAZAN; ROMANO; ABINO, 2016). O princípio de SI incentiva as partes da cadeia de abastecimento a trabalharem em prol de um elevado nível de colaboração, a fim de facilitar o desenvolvimento e a implementação de iniciativas respeitadoras do ambiente. Os parceiros da SI descobrem soluções inovadoras e mutuamente benéficas com base na rica troca de informações resultante de relacionamentos próximos (BANSAL; MCKNIGHT, 2009).

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Desde a origem da humanidade, o homem usufrui do meio ambiente para produzir, descartando constantemente materiais não aproveitados. O aumento do consumo e a consequente degradação ambiental foram iniciados principalmente após a Revolução Industrial. Desde então, o planeta já emite sinais que esse ritmo de produção e consumo pode estar além da sua capacidade de extração e regeneração (DIAS, 2011).

Os resíduos sólidos têm sua denominação derivada do latim “residuu”, que significa o que sobra de determinada substância, acompanhado da expressão “sólido” para diferenciar dos líquidos e gases (NAIME; GARCIA, 2004, p.113).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da norma NBR 10.004/2004, define os resíduos sólidos como (ABNT, 2004a):

Resíduos nos estados sólido e semisólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004a, p. 1)

Para que a gestão destes resíduos seja adequada é necessário dividi-los em classes. A classificação de resíduos (ABNT, 2004a):

Envolve a identificação do processo ou atividade, de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias, cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização dos resíduos deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo de origem (ABNT, 2004a, p. 2).

Em relação à origem, ou natureza, a Política Nacional de Resíduos Sólidos os classificam conforme quadro 1. Quanto à periculosidade, a norma NBR 10.004/2004 agrupa os resíduos sólidos em duas classes, conforme seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde, as quais são apresentadas no quadro 2.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem

Tipo de Resíduo	Origem
a) Resíduos domiciliar	Atividades domésticas em residências urbanas.
b) Resíduos de limpeza urbana	Varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.
c) Resíduos sólidos urbanos	Envolvem alíneas a e b.
d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço	Estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, exceto os referidos nas alíneas b, e, g, h e j.
e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	Serviços públicos de saneamento básico, exceto os referidos na alínea c.
f) Resíduos industriais	Processos produtivos e instalações industriais.
g) Resíduos de serviços de saúde	Serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos de Sisnama e SNVS.
h) Resíduos da construção civil	Construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.
i) Resíduos agrossilvopastoris	Atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos relacionados a insumos utilizados nestas atividades.
j) Resíduos de serviços de transporte	Portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira.
k) Resíduos de mineração	Atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Fonte: Brasil (2010).

Quadro 2 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade.

Resíduos de Classe I	Resíduos de Classe II	
Perigosos	Não Perigosos	
	A – Não Inerte	B – Inerte
Podem acarretar riscos à saúde pública e ao meio ambiente.	Não se enquadram nos resíduos de classe I (perigosos) e nem nos de classe II B (inertes).	Não se enquadram em nenhuma das outras classes.
Possuem características de periculosidade, como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.	Podem possuir propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.	Resíduos que ao serem amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato com água destilada, à temperatura ambiente, não apresentam constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção da cor, turbidez, dureza e sabor.
Solventes halogenados, solventes não halogenados, lodos de tratamento de efluentes, resíduos e lodos de tintas provenientes da pintura industrial, óleo lubrificante usado ou contaminado, resíduos da indústria química, entre outros.	Resíduos orgânicos, sucatas de metais ferrosos e não ferrosos, madeira, papel, papelão, borracha, plástico, entre outros.	Resíduos da indústria de rochas ornamentais, vidros, minerais, e outros.

Fonte: adaptado de ABNT NBR 10.004 (2004a).

2.3.1 Resíduos Sólidos Industriais (RSI)

Todas as atividades, ou processos, envolvidos na vida dos produtos resultam em impactos ambientais devido ao consumo de recursos, emissões de substâncias no ambiente natural ou outras mudanças provocadas no ambiente (REBTIZER et al., 2004). As atividades industriais geram diferentes tipos de resíduos com características diversas por serem originários de diferentes setores, tais como metalúrgico, químico, petroquímico, celulose e papel, alimentício, mineração e outros (IPEA, 2012).

Quanto à definição de resíduo sólido industrial, a resolução do Conselho Nacional do Meio-Ambiente nº. 313/2002, que dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais, estabelece que (CONAMA, 2002):

É tudo o que resulte de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso – quando contido, e líquido – cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isto soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição (CONAMA, 2002, p. 1).

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu artigo 13 (BRASIL, 2010), os resíduos industriais são definidos como “aqueles gerados nos processos produtivos e instalações industriais”.

De acordo com Philippi Junior (2005, p. 292), “os resíduos industriais são gerados tanto nos processos produtivos quanto nas atividades auxiliares, como manutenção, operação de área de utilidades, limpeza, obras e outros serviços”. Segundo este autor as atividades industriais que influenciam a geração de resíduos são:

- Projeto do processo: o qual possibilita o projeto dos processos industriais com a adoção de tecnologias alternativas que podem ser mais eficientes quando se trata de geração de resíduos;
- Aquisição e armazenamento de matéria-prima: a aquisição de matérias-primas com qualidade superior contribui para a melhoria de eficiência do processo. Além disso, matérias-primas mais puras, geram menores quantidades de resíduos e menores quantidades de lotes com defeito são rejeitados. No entanto, a compra de matérias-primas em excesso pode gerar lotes rejeitados devido a validade;
- Operações de produção: operações de produção e controle de processo padronizados e eficiente evitam acidentes e rejeição de lotes por defeito;
- Limpeza e manutenção de equipamentos: as atividades de limpeza extraem lodos, lamas, escórias, poeiras, óleos, e outros resíduos;
- Derramamentos e vazamentos: líquidos que vazaram ou derramaram de contêineres não são mais aceitos pelo controle de qualidade para uso na produção. Além disso, os panos, estopas, serragem e outros materiais utilizados para contenção passam a fazer parte do próprio resíduo.

Para Tocchetto (2009), citado no diagnóstico de RSI, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), os resíduos industriais podem ser representados por resíduos de processo, resíduos de operações de controle de poluição ou descontaminação, materiais adulterados, materiais e substâncias resultantes de atividades de remediação de solo contaminado, resíduos da purificação de matérias-primas e produtos, cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas. Entre estes, inclui-se uma grande quantidade de material perigoso (em torno de 40%) que necessita de tratamento especial devido ao seu alto potencial de impacto ao meio ambiente e à saúde.

Devido à considerável gama de processos industriais e produtos auxiliares envolvidos, os resíduos sólidos resultantes das atividades industriais comumente apresentam riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, revelando a necessidade de especial atenção, sendo que a responsabilidade pelo manuseio, acondicionamento, armazenagem, coleta, transporte e disposição final destes resíduos é imposta legalmente às próprias indústrias (LIBÂNIO, 2002).

2.3.2 Aspectos legais e normativos

O estabelecimento de controle das ações tomadas no gerenciamento de resíduos faz parte da obrigatoriedade legal. De acordo com Moreira (2001), o desenvolvimento de uma estrutura legislatória de base é papel fundamental dos órgãos públicos no sentido de promover a conscientização ambiental e incentivar a melhoria tecnológica voltada para a prevenção da poluição.

Em 29 de outubro de 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), criou a Resolução nº 313 que revela a preocupação com a quantidade de resíduos industriais gerados, seu manuseio e dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. Em seu artigo 1º institui que o controle específico dos resíduos existentes ou gerados pelas atividades industriais é parte integrante do processo de licenciamento ambiental (BRASIL, 2002), o qual é uma obrigação legal prévia à instalação de qualquer empreendimento ou atividade potencialmente poluidora ou degradadora do meio ambiente (IPEA, 2012).

A Resolução Conama nº 313/2002 reúne o conjunto de informações sobre geração, características, armazenamento, transporte, tratamento, reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final de resíduos sólidos industriais. Além disso, apresenta uma classificação dos resíduos sólidos industriais em três classes (CONAMA, 2002). A classificação apresentada pelo Conama para resíduos de classe II e III pode ser identificada no Anexo I.

Em 2 de agosto de 2010, o governo brasileiro instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da lei nº 12.305 regulamentada pelo decreto nº 7.405, inaugurando um marco regulatório que prevê obrigações ao setor produtivo, impõe regras e amplia ações visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

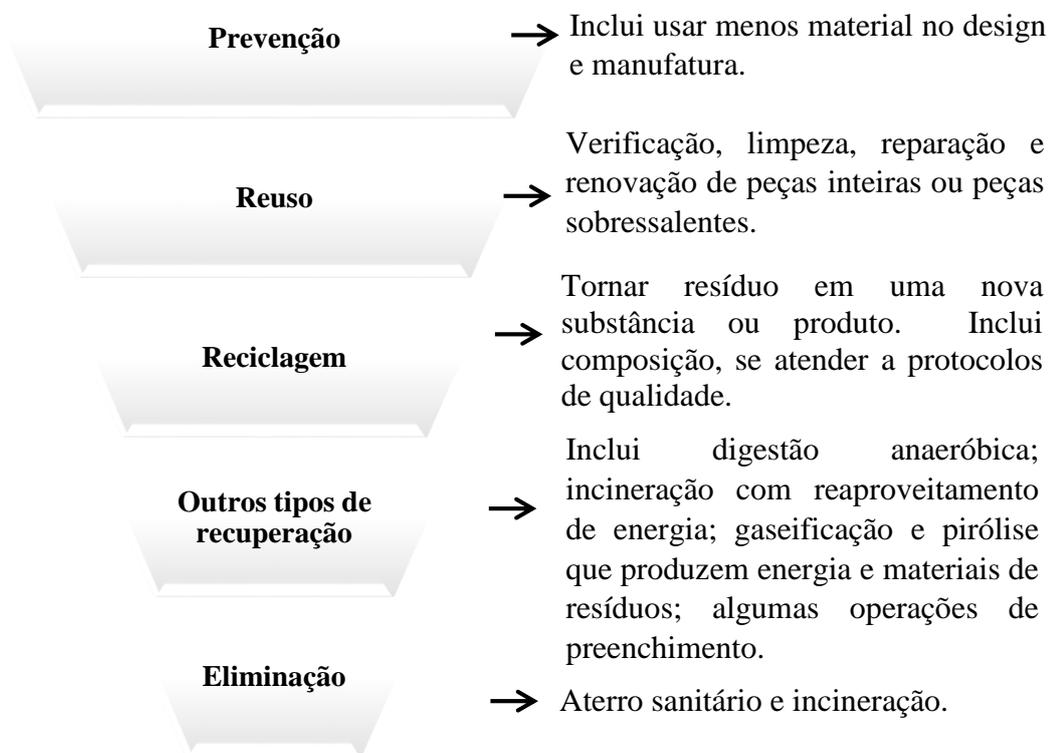
A PNRS estabelece a chamada responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. A lei estabelece, dentre outras coisas, que fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e poder público são responsáveis pela viabilização de práticas de

gestão de resíduos conforme a hierarquia prioritária de não geração, redução, reutilização, reciclagem, disposição em aterros (BRASIL, 2010).

A PNRS orienta-se na diretiva da União Europeia de resíduos sólidos e estabelece uma ordem de prioridade para seu gerenciamento. Alternativas para gestão de resíduos são listadas, em termos de preservação ambiental, da opção definida como mais favorável até a menos favorável (MAKISHI, 2012). Nesta diretiva a hierarquia de resíduos apresentada introduz uma escala para classificar os diferentes tipos de resíduos em cinco níveis de acordo com os seus procedimentos de gestão (RYBICKA et al., 2015). Esta hierarquia dos processos de gerenciamento dos resíduos é ilustrada na Figura 4.

De acordo com a hierarquia, a prevenção de resíduos, ou redução de uso, apresenta-se como a estratégia de processamento mais importante. Em seguida aponta-se em ordem de importância a reutilização, a reciclagem, a recuperação, sendo a eliminação em aterro ou incineração, a última opção sugerida para a destinação dos resíduos sólidos. É importante ressaltar que nesta pesquisa são enfatizadas as estratégias de reuso e reciclagem para reaproveitamento dos resíduos sólidos industriais como matéria-prima para outros processos.

Figura 4 – Hierarquização dos processos de gerenciamento de resíduos.



Fonte: Rybicka et al., (2015).

Outra fonte de apoio à gestão de resíduos sólidos são as normas brasileiras regulamentadoras (NBRs) elaboradas pela ABNT que, apesar de não possuírem poder legal, apresentam bases técnicas e conceitos utilizados na gestão. No contexto de classificação dos resíduos sólidos destaca-se o conjunto de normas NBR 10004/2004 – classificação (ABNT, 2004a); NBR 10005/2004 – obtenção de lixiviado de resíduos sólido (ABNT, 2004b); NBR 10006/2004 – obtenção de solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004c); e a NBR 10007/2004 – amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004d).

Por fim, destaca-se a regulamentação da Instrução Normativa (IN) nº 13 em 2012 pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) na qual é publicada a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos e traz uma nova codificação para classificação e caracterização dos resíduos sólidos (IBAMA, 2012).

2.4 PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

A Teoria das Decisões nasceu de Herbert Simon que a utilizou para explicar o comportamento humano nas organizações. O autor, no seu livro “O Comportamento Administrativo” (1970), menciona que a Teoria Comportamental concebe a organização como um sistema de decisões (MORITZ; PEREIRA, 2006).

De acordo com Chiavenato (2003):

A organização é um sistema de decisões em que cada pessoa participa consciente e racionalmente, escolhendo e decidindo entre alternativas mais ou menos racionais que são apresentadas de acordo com sua personalidade, motivações e atitudes. [...] Em outros termos, a pessoa decide em função de sua percepção das situações. Em resumo, as pessoas são processadores de informação, criadoras de opinião e tomadoras de decisão. (CHIAVENATO, 2003, p.348).

As decisões são tomadas em reação a um problema, o qual existe quando há discrepância entre o estado atual e o estado desejado das coisas (ROBBINS; JUDGE; SOBRAL, 2010, p.167). Desta forma, a tomada de decisão é o processo pelo qual um indivíduo tenta preencher uma falha, ou oportunidade, entre as condições operacionais atuais de um determinado sistema e as condições mais vantajosas a serem alcançadas no futuro. Para atingir o estado esperado é necessário definir um conjunto de opções e depois selecionar uma decisão baseada na comparação efetuada entre as vantagens e desvantagens de cada opção, sendo a maioria das decisões tomadas em resposta a um problema (VERCELLIS, 2009).

As decisões são escolhas tomadas a fim de atingir determinados propósitos, podendo ser realizada de forma objetiva ou subjetiva. Quanto à racionalidade e a intuição envolvidos no processo decisório Maximiano (2009) afirma que:

[...] Quanto maior a base de informação, mais racional é o processo. Quanto maior a proporção de opiniões e sentimentos, mais intuitivo se torna. A racionalidade e a intuição são atributos humanos complementares e não concorrentes (MAXIMIANO, 2009, p.71).

Independentemente do aspecto da decisão, esta deve ser fruto de um processo sistematizado, que envolve o estudo do problema a partir de um levantamento de dados, produção de informação, estabelecimento de propostas de soluções, escolha da decisão, viabilização e implementação da decisão e análise dos resultados obtidos (GUIMARÃES; ÉVORA, 2004).

Os principais modelos interpretativos do processo decisório desenvolvido ao longo do tempo são (MORITZ; PEREIRA, 2006):

- Modelo Clássico: enfatiza os procedimentos lógicos da tomada de decisão, considerando primeiramente os fins e só posteriormente os meios durante o processo;
- Modelo Comportamentalista: o comportamento dos indivíduos na organização é previsível. Portanto, o gestor procura prevê-lo para evitar situações problemáticas no contexto do processo decisório;
- Modelo Normativo: preocupação central no que deve ser realizado. Refere-se ao modelo de grupos técnico-profissionais;
- Modelo Racional: tem como objetivo maximizar os resultados.

Chiavenato (2007, p.169) define o envolvimento de no mínimo seis elementos básicos em toda tomada de decisão: (i) o tomador de decisão; (ii) os objetivos que se pretende alcançar; (iii) as preferências ou critérios de escolha; (iv) a estratégia adotada e sequência de ações; (v) a situação vivenciada pelo decisor que abrange aspectos do ambiente; e (vi) o resultado da estratégia.

Em relação à classificação das decisões, estas podem ser definidas conforme critérios de natureza e âmbito. Sob a perspectiva da natureza, as decisões podem ser segmentadas em (VERCELLIS, 2009):

- Estruturadas, caso sejam baseadas numa estrutura bem definida e recorrente no processo de tomada de decisão. Normalmente são mais adequadas para a automação operacional, e podem ser definidas, por exemplo, por um algoritmo mais ou menos explícito ao gestor que toma a decisão;
- Não estruturadas, quando existe pelo menos um elemento do sistema (inputs, outputs e meios de transformação) que não pode ser detalhado e pré-definido. Este tipo de decisão é por vezes verificado quando ocorre um processo de tomada de decisão pela primeira vez, ou que acontece muito raramente;
- Semiestruturada, quando alguma fase de decisão é estruturada e outra não. Refletem a maioria das decisões enfrentadas pelos gestores das organizações.

A classificação quanto ao âmbito das decisões está diretamente atrelada aos níveis organizacionais. Desta forma, as decisões podem ser definidas como (VERCELLIS, 2009):

- Decisões estratégicas: quando afetam a organização como um todo e são tomadas a um nível superior da organização, geralmente pela gestão de topo;
- Decisões táticas: quando afetam apenas parte da organização, limitando-se a um único departamento, e são tomadas a um nível médio da organização, geralmente por gestores de departamento, estando focadas na gestão de processos;
- Decisões operacionais: quando se referem a atividades específicas desenvolvidas no interior de uma organização e são geralmente tomadas a um nível inferior da organização.

Para que o processo decisório seja realizado é necessário o desenvolvimento de algumas etapas sequenciais. Segundo Chiavenato (2007), as etapas constituintes do processo decisório são apresentadas como: (i) definição e diagnóstico do problema, a qual envolve coleta de dados e fatos; (ii) procura de soluções alternativas mais promissoras; (iii) análise e comparação das alternativas de solução; (iv) seleção e escolha da melhor alternativa como plano de ação.

De acordo com Abib (2010):

O processo decisório muitas vezes conta com um conjunto incompleto de informações que servem de subsídio. Neste sentido, consciente da imperfeição das informações disponíveis, o agente decisor deve se utilizar de informações com qualidade para minimizar os efeitos de uma escolha prejudicial (ABIB, 2010, p. 74).

Atualmente, as organizações devido ao alto nível de competição são desafiadas a realizar mudanças no seu ambiente organizacional. Para tanto, necessitam desenvolver um processo de decisão seguro, rápido e estratégico de modo a alcançar vantagens competitivas sobre os seus concorrentes mais diretos. Para adquirir vantagens competitivas é necessário ter a perfeita noção de que a informação e o conhecimento são os bens mais importantes e necessários para qualquer instituição (MAIMON; ROKACH, 2010). Neste sentido, identifica-se a necessidade de informações relevantes e de dispositivos de filtros, diante da existência de uma massa de informações irrelevantes (DOS SANTOS, 2007).

Uma vez que o encadeamento entre dados, informações e conhecimento influencia diretamente nas decisões, é essencial a geração de informações úteis, confiáveis e de fácil acesso. Desta forma, gestores passam a tomar decisões mais assertivas para prosseguir com as estratégias definidas pelas organizações.

2.4.1 Elementos da tomada de decisão

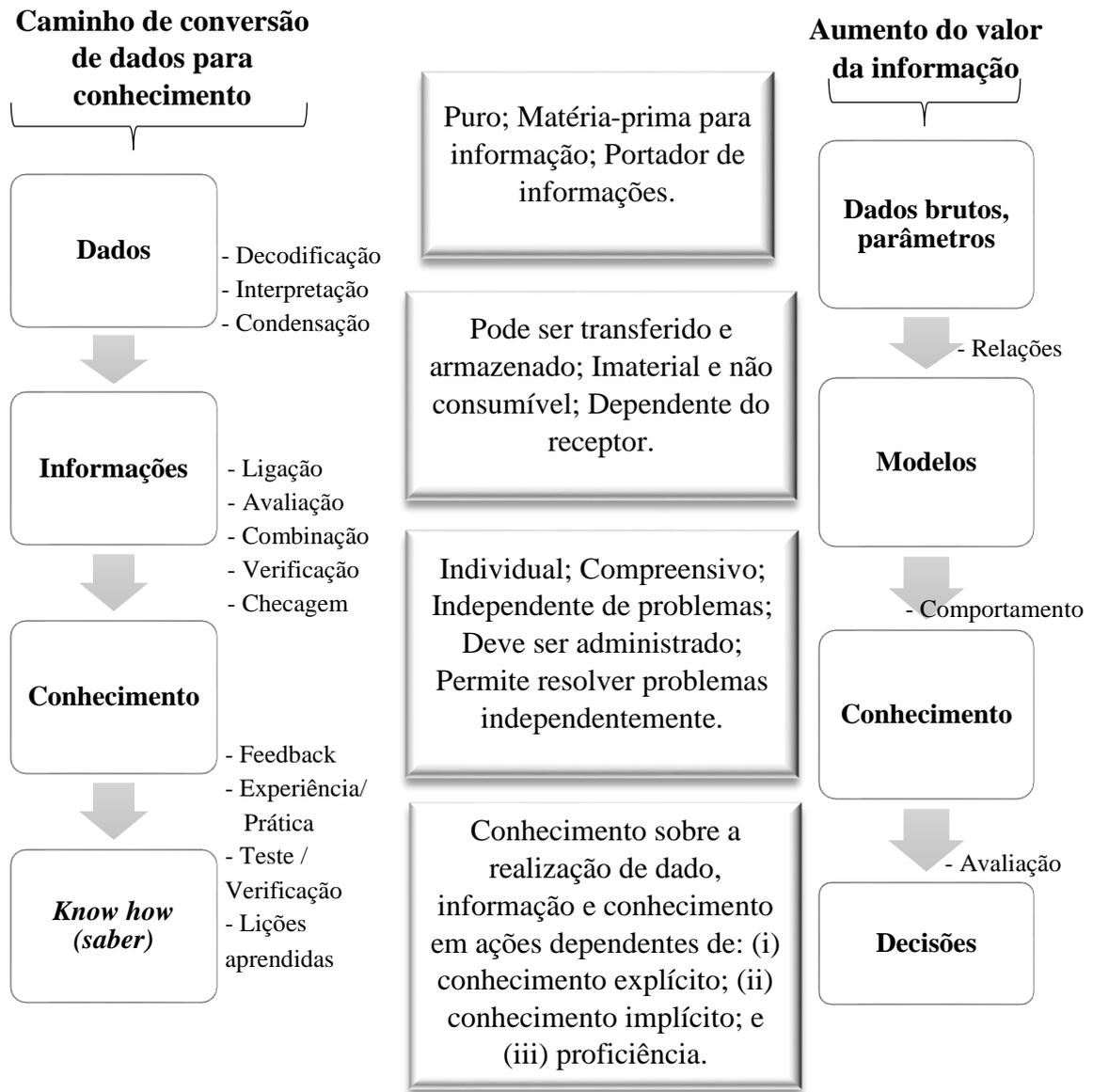
A tomada de decisão nas organizações é um processo realizado com base em dados, informações e conhecimento, os quais são considerados elementos fundamentais para este processo (ANGELONI, 2003).

A diferença entre dados, informação e conhecimento pode ser compreendida através das observações de Vercellis (2009). De acordo com este autor, os dados representam uma codificação estruturada de entidades primárias únicas, bem como de transações envolvendo duas ou mais entidades primárias. Já a informação é o resultado de atividades de extração e processamento realizadas em dados, e parece significativa para aqueles que a recebem em um domínio específico. Por fim, o conhecimento refere-se à informação transformada e usada para tomar decisões, bem como desenvolver as ações correspondentes. É composto de informações colocadas para trabalhar em um domínio específico, reforçada pela experiência e competência dos tomadores de decisão na resolução de problemas complexos.

Neste mesmo sentido, Bauch (2004) considera os dados como matéria-prima da informação, pois se apresentam como uma sequência de caracteres ou símbolos usados em um contexto particular que descrevem um estado, situação ou evento. A informação, por sua vez, tem um propósito particular dentro de um contexto e a geração de conhecimento só é possível com incorporação, ligações e transferências de informação. De acordo com Schwankl (2002), citado por Bauch (2004), há um encadeamento entre dados, informações e conhecimento que

aumenta o valor da informação e desta maneira apoia a tomada de decisão. A Figura 5 apresenta esta relação entre dados, informações e conhecimento.

Figura 5 – Dados, informação, conhecimento e o valor adicionado.



Fonte: Schwankl (2002) citado por Bauch (2004, p. 27).

2.5 MODELAGEM DE SISTEMAS

A modelagem de sistemas é um processo de apoio à tomada de decisão, que demanda análises mais robustas e elaboradas para a definição da solução do problema (MILLER; KOSSIK; VOSS, 2003).

Neste sentido, é importante entender o conceito de sistema. Um sistema é um conjunto de entidades que operam com um determinado propósito comum (FORRESTER, 1968; WINSTON, 1993; LAW; KELTON, 2000).

O sistema sempre pressupõe uma interação causa e efeito entre as partes que o compõem. O objetivo do sistema deve ser conhecido com clareza para que as interações entre as partes sejam identificadas (FORRESTER, 1968).

Law e Kelton (2000) agrupam os sistemas em dois tipos:

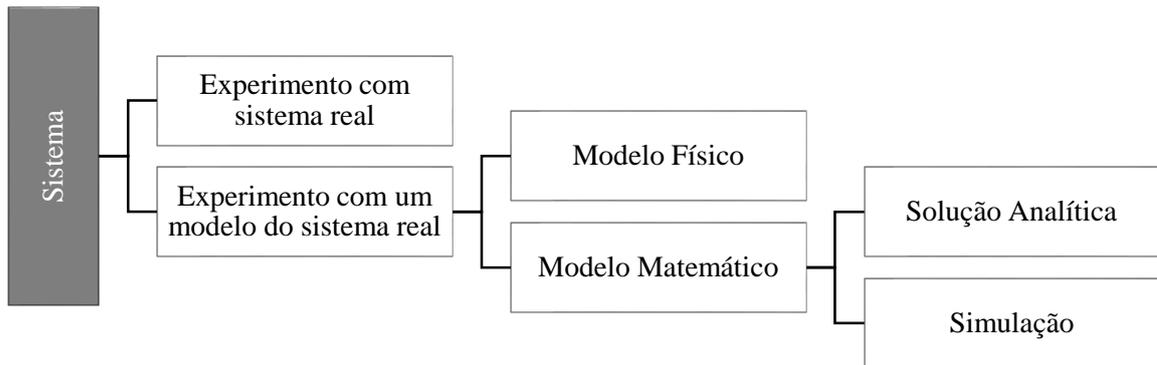
- **Sistemas Discretos:** As variáveis de estado mudam instantaneamente em momentos distintos no tempo. Um sistema que descreve os caixas automáticos de um banco é um exemplo, pois as variáveis de estado que descrevem o sistema, como o número de clientes na fila e o número de caixas automáticos ocupados, são números inteiros positivos;
- **Sistemas Contínuos:** As variáveis de estado que representam o sistema mudam continuamente com o tempo, não há descontinuidades. A vazão de água em uma represa, por exemplo, é um exemplo de variável de estado contínua.

Para estes autores, na prática são raros os sistemas puramente discretos ou puramente contínuos. De uma forma geral, os sistemas são classificados com base no tipo de variável predominante.

De acordo com Law e Kelton (2000), um sistema pode ser estudado por meio de experimentos reais ou por meio de experimentos com modelos representativos do sistema real. Segundo estes autores, os modelos podem ser subdivididos em: (i) modelos físicos – protótipos de um objeto de estudo ou pedaços de um sistema maior, como a cabine de um avião para a simulação de voo; e (ii) modelos matemáticos – representação do sistema por meio de relações lógicas e quantitativas, manipuladas e modificadas para observar o comportamento e inferir como o sistema reagiria. A Figura 6 apresenta resumidamente as possíveis formas de estudo de um sistema.

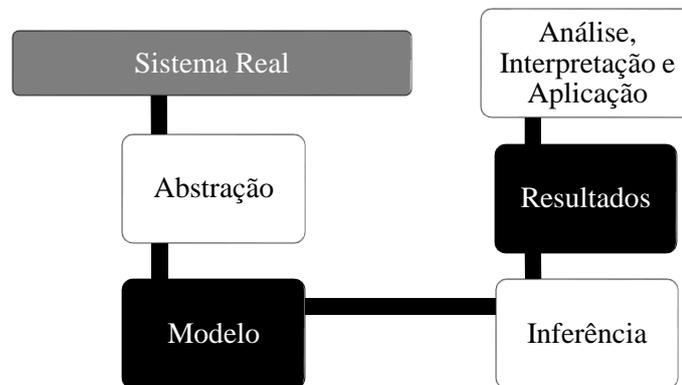
Pode-se perceber que a construção de um modelo é fundamental para a representação de um sistema. Um modelo é similar ao sistema que o representa, porém mais simples, uma vez que o seu propósito é permitir a predição dos efeitos provocados pelas mudanças no sistema (MARIA, 1997).

Uma das principais etapas num estudo de simulação é a criação de um modelo, ou seja, a modelagem para observar o comportamento do sistema em estudo, sob determinadas condições, de forma científica (FREITAS FILHO, 2008).

Figura 6 – Formas de estudo de um sistema.

Fonte: Law e Kelton (2000).

O processo de criação e uso de um modelo é iterativo. Este processo se desenvolve por meio de inferências sobre certos aspectos observáveis do sistema real. É através da inferência, bem como da construção e uso de modelos que melhoramos nossa compreensão dos sistemas (IZQUIERDO et al., 2008). Um esquema geral deste processo pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema geral do processo.

Fonte: Izquierdo et al. (2008).

De acordo com Chwif e Medina (2010), um modelo é:

Uma representação simplificada das diversas interações entre as partes do sistema. É uma abstração da realidade, que se aproxima do verdadeiro comportamento do sistema, mas sempre mais simples do que o sistema real. [...] A intenção principal é capturar o que é realmente importante no sistema para a finalidade em questão (Chwif e Medina, 2010, p. 5).

De Medeiros, Moser e Dos Santos (2015) apontam que o modelo de um dado sistema irá conter as variáveis necessárias para a compreensão do seu comportamento, entendendo-se a relação de compromisso que deve existir entre a descrição e desempenho. Descrições muito detalhadas de um sistema podem tornar as análises muito complexas e aumentar tempo e custo, ao passo que descrições muito simples podem resultar em análises incorretas ou incompletas do sistema-objeto de estudo.

Para Barioni (2002), os modelos devem ser tão simples quanto possíveis e tão complexos quanto necessários para que ocorra um balanço ótimo entre os erros das estimativas e dos parâmetros modelados. Maria (1997) afirma que o modelo deve ser suficiente complexo para incorporar as características mais representativas do sistema, mas não tão complexo a ponto de ser impossível entender seu comportamento através da experimentação.

2.6 MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação é um caso particular de modelo matemático de um sistema (BANKS et al., 2000). Este modelo é geralmente usado para investigar projetos ou operações alternativas antes de uma tomada de decisão (MILLER; KOSSIK; VOSS, 2003).

A simulação é contextualizada como uma técnica ou ferramenta, dentro do escopo da Pesquisa Operacional, que opera a partir da concepção de modelos abstraídos dos seus sistemas de origem. A técnica busca analisar os resultados e, desta forma, constitui-se em uma valiosa fonte de geração de conhecimento sobre o problema abordado (DE MEDEIROS; MOSER; DOS SANTOS, 2015).

De acordo com Pegden, Shannon e Sadowski (1995), a simulação pode ser definida como “o processo de elaborar modelos de um sistema real e conduzir experimentos com estes, com o propósito de compreender o comportamento do sistema ou avaliar estratégias para a operação do mesmo”.

Um modelo de simulação pode ser entendido como um conjunto de regras apresentadas de várias formas, incluindo equações diferenciais, diagramas de estados, fluxogramas de processo e cronogramas, que representam como ir do estado atual do sistema para um estado futuro (GRIGORYEV, 2015).

Freitas Filho (2008) afirma que:

A simulação permite realizar estudos sobre os sistemas modelados para responder questões do tipo “O que aconteceria se?”. O principal apelo ao uso dessa ferramenta, é que tais questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob investigação

sofram qualquer perturbação, uma vez que os estudos são realizados no computador (FREITAS FILHO, 2008, p.23).

Pode-se considerar a simulação como uma ampla coleção de métodos e aplicações com o objetivo de mimetizar o comportamento de um sistema do mundo real, geralmente com o uso de um computador e *software* apropriado (KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 2002). Para simular um sistema utilizando um programa de computador, é necessário realizar a tradução do modelo para a linguagem da simulação (BRITO, 2008).

A simulação computacional pode ser realizada mesmo para sistemas que ainda não existam, permitindo assim, antecipar problemas. Portanto, a simulação é uma abordagem tanto racional, por envolver o esforço intelectual na modelagem conceitual dos problemas (com base no objeto concreto ou produtos de experimentos de pensamento); quanto empírica, por permitir um processo de depuração dos problemas abordados baseado em um método de tentativa e erro (DE MEDEIROS; MOSER; DOS SANTOS, 2015).

De acordo com Brito (2008), as principais funções da técnica de simulação são:

- Analisar um sistema antes de sua implementação;
- Aprimorar o desempenho de um sistema já em operação;
- Compreender melhor o comportamento de um sistema;
- Comparar as respostas das análises hipotéticas “e se” conduzidas.

Chwif e Medina (2010), apresentam as características que a técnica não possui, a partir do que o senso comum entende por simulação. De acordo com estes autores, a simulação não pode prever o futuro. O que a simulação pode prever, com certa confiança, é o comportamento de um sistema, baseado em dados de entrada específicos e em premissas determinadas. Outra característica que a simulação não possui é a de ser um modelo matemático, apesar de utilizar fórmulas matemáticas ou equações. E além disso, a simulação não é uma ferramenta estritamente capaz de identificar uma solução ótima, embora possa ser combinada com algoritmos de otimização. Para estes autores, a simulação é na verdade uma ferramenta de análise de cenários, e que não pode substituir o elemento humano no processo de tomada de decisão.

Para Law e Kelton (2000), a modelagem e simulação computacional tem como vantagens:

- A possibilidade de abordar sistemas complexos com elementos estocásticos sem condições de tratamento por técnicas analíticas;

- O maior controle sobre as condições experimentais do que a experimentação no sistema real;
- A experimentação de forma interativa;
- A replicação precisa dos experimentos e o teste de diferentes cenários para o sistema;
- Um menor tempo para simular longos períodos;
- E uma maior economia do que testes envolvendo sistemas reais.

Miller, Kossik e Voss (2003) afirmam que modelos de simulação confiáveis e bem construídos podem ser uma maneira econômica de explorar os riscos e benefícios de decisões alternativas, sem incorrer em tempo e despesas de projetos experimentais ou de protótipos. Por outro lado, pode-se afirmar que a simulação não fornece como informação a solução correta, mas sim o teste de alternativas fornecidas pelo usuário (BRITO, 2011; LAW; KELTON, 2000), e que alguns estudos de simulação podem ser demorados e consumir um alto nível de recursos (LAW; KELTON, 2000).

A técnica transita entre os objetivos finais de ser um elemento de aprendizado e de predição, permitindo assim, atingir um bom nível de compreensão do sistema para atuação eficiente sobre ele (BRITO, 2011). Como a simulação refere-se ao processo de execução de um modelo, à medida que novas indagações sobre o comportamento do sistema modelado surgem, novas análises podem ser executadas (FREITAS FILHO, 2008). Em geral, a modelagem de simulação é uma boa ferramenta para problemas complexos, em que a dinâmica do tempo é importante (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004).

A categorização dos modelos de simulação é diversificada. De acordo com Banks et al. (2000) e Mourtzis et al. (2015), os modelos de simulação podem ser caracterizados em:

- Modelos estáticos – compreendem um sistema de equações, que representam o estado do sistema sob investigação em um ponto específico no tempo. A variável tempo não é importante;
- Modelos dinâmicos – incorporam a variável tempo nas equações, permitindo investigar a progressão do sistema ao longo do tempo;
- Modelos estocásticos ou probabilísticos – envolvem a utilização de um componente probabilístico que, por exemplo, define o tempo de chegada entre ordens por amostragem a partir de uma distribuição. Possuem variáveis de entrada com

componente randômico que podem assumir quaisquer valores dentro de intervalos definidos por distribuições de probabilidade;

- Modelo determinísticos – existe uma solução única para uma determinada entrada. Os valores de parâmetros são constantes;
- Modelos contínuos e discretos – diferem na maneira como o tempo é considerado. No primeiro modelo, o tempo passa de maneira linear, enquanto no segundo modelo, o tempo é separado em pedaços distintos. Nos modelos contínuos, as variáveis de estado que representam o sistema mudam continuamente com o tempo. Nos modelos discretos, as variáveis de estado mudam em momentos distintos no tempo.

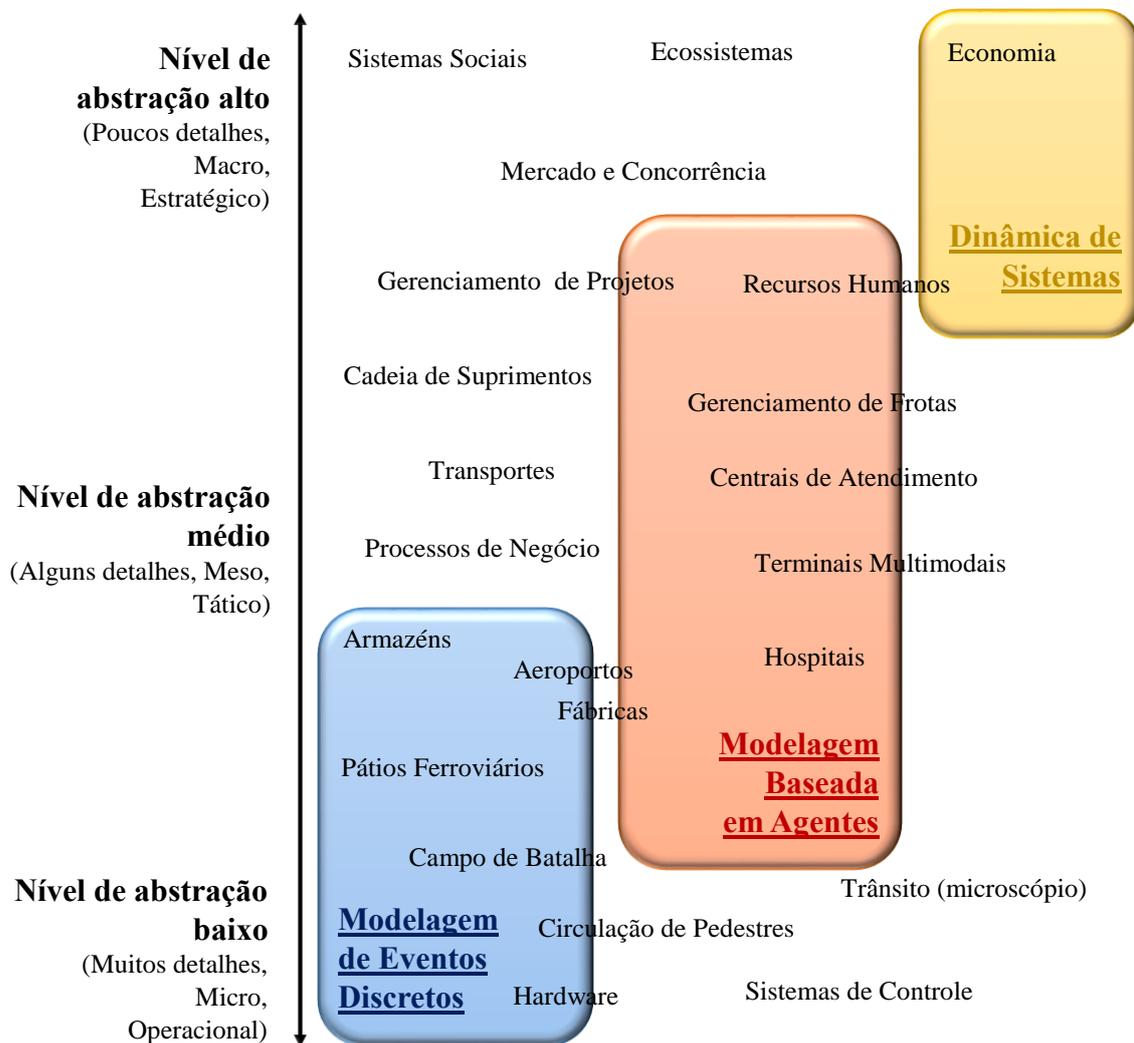
De acordo com Grigoryev (2015), as modelagens de simulação modernas usam três abordagens específicas: eventos discretos, modelagem baseada em agentes e dinâmica de sistemas. Cada abordagem se aplica a uma gama específica de níveis de abstração. A figura 8 apresenta as abordagens de modelos de simulação atreladas aos níveis de abstração.

A dinâmica de sistemas pressupõe um nível de abstração alto e é normalmente usada para modelagem estratégica. Eventos discretos suportam abstrações de níveis médio e baixo. No meio destas abordagens estão os modelos baseados em agentes, que podem variar desde modelos muito detalhados, nos quais os agentes representam objetos físicos, até modelos altamente abstratos, em que agentes são empresas ou governos (GRIGORYEV, 2015).

Segundo Grigoryev (2015), escolher o nível de abstração certo é crítico para o sucesso de um projeto de modelagem. No processo de desenvolvimento do modelo é normal, e até mesmo desejável de vez em quando, reconsiderar o nível de abstração do modelo. Na maioria dos casos, inicia-se em um nível de abstração alto e adicionam-se detalhes na medida em que o modelo avança. É possível modelar as diferentes partes de um sistema usando diferentes abordagens e, nessas situações, um modelo híbrido atenderá melhor as suas necessidades (BORSHCHEV, 2013).

De acordo com pesquisa realizada por Guedes, De Souza e Borsato (2019), o modelo baseado em agentes (MBA) e o modelo de dinâmica de sistemas (DS) são os paradigmas amplamente adotados na literatura para a modelagem de sistemas de simbiose industrial. Dado que um ambiente de simbiose industrial é considerado um sistema complexo adaptativo caracterizado por incerteza, emergência e adaptabilidade, entre outros, as principais abordagens disponíveis para modelagem e simulação desse tipo de sistema são MBA e DS (ROMERO; RUIZ, 2013, 2014). A escolha entre as abordagens deve ser baseada nas características e objetivos do sistema a ser modelado (ROMERO; RUIZ, 2014).

Figura 8 – Modelagem e níveis de abstração.



Fonte: Grigoryev (2015).

Na modelagem computacional, o uso da simulação baseada em agentes e da dinâmica do sistema, potencializa a construção de modelos que combinam a riqueza descritiva dos modelos verbais com o rigor formal dos modelos matemáticos mais abstratos (IZQUIERDO et al., 2008).

2.7 MODELAGEM BASEADA EM AGENTES (MBA)

A Modelagem Baseada em Agentes pode ser considerada um novo paradigma para a próxima geração de projetos de sistemas de manufatura, pois permite inserir elevado grau de individualização, autonomia e iteratividade aos agentes considerados no sistema modelado (MACAL; NORTH, 2009). Esta abordagem de modelagem é utilizada para simular as ações e

interações de indivíduos autônomos, com o objetivo de avaliar a maneira como afetam o sistema como um todo (ZHENG et al., 2013).

Apesar de a definição precisa de simulação baseada em agentes variar em todos os campos de estudo, a sua filosofia e aplicabilidade são similares: simular a interação entre agentes autônomos para identificar, explicar, gerar e delinear comportamentos (CHAN; SON; MACAL, 2010).

Desta forma, os agentes são projetados especificamente para simular comportamentos individuais observados no sistema: (i) como reativo (reposta programada a estímulos específicos); (ii) orientada para objetivos (resposta planejada pelos agentes para atingir um objetivo); (iii) e de aprendizagem (resposta influenciada pela experiência passada do agente). Agentes possuem percepções específicas de seus ambientes, que podem ser estocásticas e compartilhada com outros agentes. Possuem ainda específica e limitada capacidade para modificar seu ambiente. Similarmente, agentes são ditos sociais quando projetados para comunicar com outros, diretamente (sinal ou mensagem) ou indiretamente (compartilhar *blackboard* ou base de dados, modificação do ambiente, percepção do comportamento de outros). Assim, a estrutura de “coletivo multiagente” é tanto dinâmica quanto dependente do caminho, por surgir tanto do seu comportamento (escopo de suas decisões e ações) quanto da troca de informação (GHALI; FRAYRET; AHABCHANE, 2017).

Neste sentido, Ghali, Frayret, Ahabchane (2017) afirmam que a modelagem baseada em agentes é usada para estudar sistemas sociotécnico, biológico e econômico através de simulação dinâmica. A modelagem de comportamentos individuais e a interação entre os componentes chave do sistema permitem pesquisas que antecipam o impacto potencial de pequenas mudanças de comportamentos, ou alterações ambientais dos subsistemas sociais, naturais ou econômicos. Segundo Batten (2009), a MBA também tem sido usada como parte de uma ferramenta de intermediação focada em simbiose industrial.

Apesar de modelos de simulação baseados em agentes para o desenvolvimento de simbiose industrial estarem claramente em seu estágio inicial de crescimento, fornecem ideias de modelagem valiosas e perspectivas para desenvolver modelos mais precisos. O escopo limitado destes modelos e a falta de dados detalhados para calibração e validação são limitações que devem ser superadas para melhorar a utilidade e acuracidade (GHALI; FRAYRET; AHABCHANE, 2017).

De acordo com Janssen e Ostrom (2006), com frequência o objetivo dos modelos baseados em agentes, quando aplicado a sistemas socioecológicos, é compreender as interações

entre os diferentes componentes do sistema e utilizar o modelo para explorar cenários de políticas diferentes.

O conceito de agente é altamente abstrato e a literatura de modelagem de sistemas não apresenta de forma concisa a definição do termo (DE SMITH; GOODCHILD; LONGLEY, 2007; ZHANG; ZHANG, 2007). De acordo com Samuelson e Macal (2006), a principal característica de um agente é a capacidade de tomar decisões independentes. Um agente é um indivíduo discreto com um conjunto de características e regras, governando seu comportamento e sua capacidade de tomar decisões.

Weiss (1999) aponta que os agentes são utilizados para resolver problemas cujas características requerem capacidades específicas como: modularidade, descentralização, mutação, dificuldade de estruturação e complexidade.

Em relação à definição, Grigoryev (2015) menciona que:

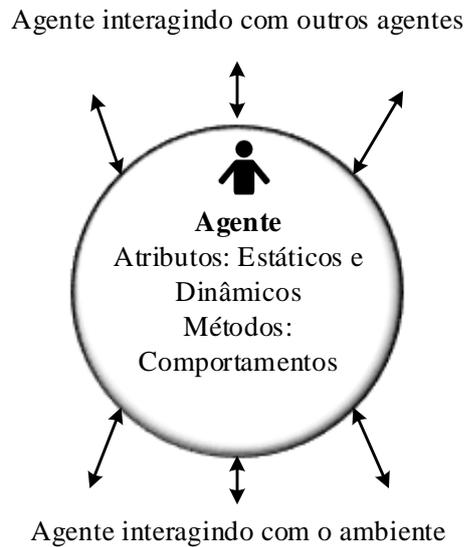
- Os agentes não precisam viver em um espaço discreto, e o espaço não faz parte de muitos modelos baseados em agentes. Quando é necessário representar espaço, normalmente é contínuo, como um mapa ou as instalações de uma planta baixa;
- Os agentes não necessariamente são pessoas, podem ser veículos, peças, projeto, ideias e até investimento;
- Um agente pode representar um objeto absolutamente passivo, como a tubulação em uma rede de fornecimento de água que depois estará associada a cronogramas de manutenção e troca, custos e eventos de deterioração;
- Um modelo baseado em agentes pode ser constituído de muitos ou poucos agentes;
- Podem existir modelos baseados em agentes em que os agentes não interagem entre si.

De acordo com Macal e North (2010), a estrutura de um modelo baseado em agentes para simulação possui três elementos: (i) um conjunto de agentes, seus atributos e comportamentos; (ii) um conjunto de relações de agentes e métodos de interação; e (iii) o ambiente dos agentes. A Figura 9 apresenta uma estrutura típica de agente.

Em um modelo baseado em agente, o agente está associado a um atributo e/ou a um método que opera no agente. Os atributos do agente podem ser estáticos, os quais não são alteráveis durante a simulação, ou dinâmicos, variáveis à medida que a simulação progride. Os métodos do agente incluem comportamentos, como regras ou representações mais abstratas,

que vinculam a situação do agente com sua ação ou conjunto de ações potenciais (MACAL; NORTH, 2010).

Figura 9 – Um agente típico.



Fonte: Macal e North (2010).

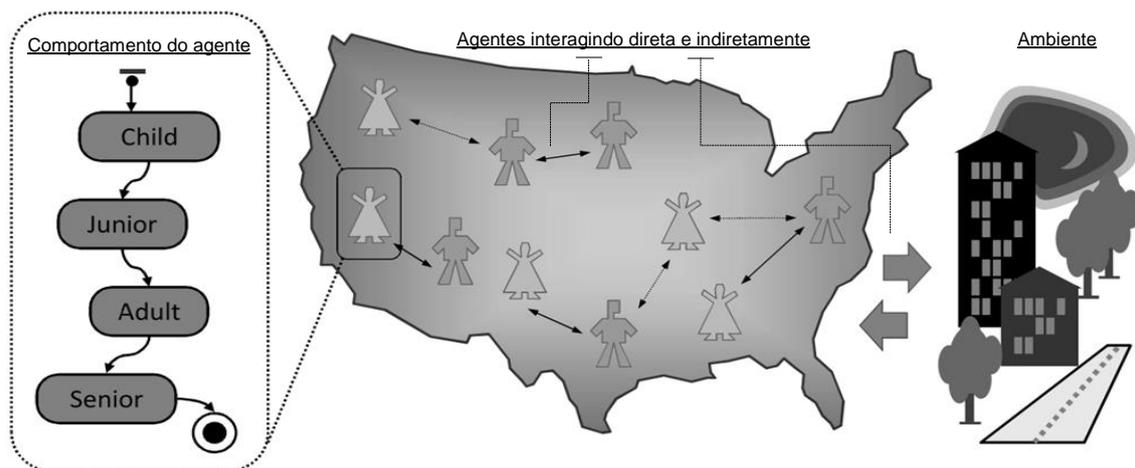
A Figura 10 representa de uma forma genérica a estrutura dos agentes em um modelo dinâmico da população de um país. O comportamento do agente é descrito através do diagrama de estados, cada agente interage direta ou indiretamente com outro agente, e/ou com o meio em que se insere.

Os elementos típicos do comportamento do agente, de acordo com Sakurada e Myiake (2009) são:

- Estado: Um estado representa um conjunto particular de ações/reações, definido como comportamento, da entidade às condições e/ou eventos. Um estado pode ser simples ou conter outros estados (composto).
- Transição: Uma transição denota a mudança de um estado para outro. A transição acontece quando ocorre um evento específico levando ao atendimento de uma condição. É então acionada uma mudança de comportamento e, conseqüentemente, uma ação ou um grupo de ações são executadas. A transição de estados está associada às condições predefinidas pelo programador, tais como tempos, taxas, mensagens recebidas ou condições booleanas. As transições podem levar a uma mudança de estado que ativa novas oportunidades de comportamento das entidades.

- Diagramas de estados: Embora muitos eventos em uma simulação sejam de claro entendimento para modelagem, algumas vezes é preciso definir comportamentos mais sofisticados, do ponto de vista da modelagem, que não podem ser representados por meio da Simulação de Eventos Discretos ou pela Dinâmica de Sistemas. Essa complexidade pode então ser modelada através de diagramas de transição de estados. Um diagrama de estado define como um conjunto de estados pode ser ativado através de eventos que ocorrem no sistema.
- Comunicação/Interação entre agentes: As mensagens são consideradas como pequenos conjuntos de informações passados entre agentes que podem representar diversos objetos do mundo real, tais comandos, sinais, entre outros.

Figura 10 – Arquitetura genérica de um modelo baseado em agente.



FONTE: Grigoryev (2015).

2.8 DINÂMICA DE SISTEMAS (DS)

A abordagem da dinâmica de sistemas foi desenvolvida pela primeira vez em 1950 por Jay W. Forrester, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), para a compreensão do comportamento dinâmico de sistemas complexos ao longo do tempo (STERMAN, 2002).

A Dinâmica de Sistema (DS) é uma metodologia para estudar e gerir sistemas complexos no contexto de gestão, organização e socioeconomia. Adota uma abordagem holística que ajuda a entender a estrutura básica de um sistema, bem como o comportamento que pode produzir (OSIPENKO; FARR, 2004).

De acordo com Grigoryev (2015), a Dinâmica de Sistemas:

- Modela o sistema como uma estrutura causal fechada que define o seu próprio comportamento;
- Permite descobrir o equilíbrio ou reforço de ciclos de retroalimentação do sistema (causalidade circular);
- E identificar estoques e fluxos.

A DS é uma abordagem que apresenta uma perspectiva integrativa do sistema e cuja principal característica é o reconhecimento de processos de *feedback* na estrutura dos sistemas modelados. A abordagem possibilita a aplicação destes processos em sistemas sociais para analisar e projetar políticas robustas ao invés de tomar decisões ótimas baseadas em previsão (HELAL, 2008).

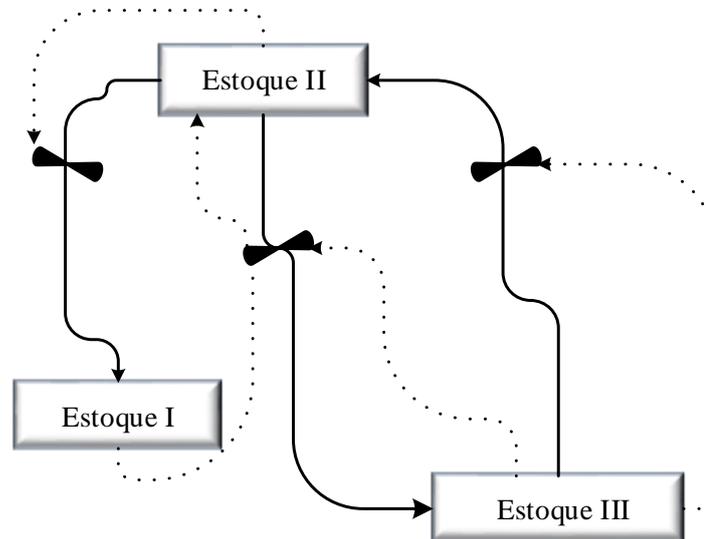
A definição mais abrangente de DS é apresentada por Sterman (2002) que a caracteriza como uma metodologia capaz de aprimorar a compreensão de sistemas complexos, enquanto captura e apresenta ao usuário os diagramas causais, *loops* de *feedback* e de fluxo, e as interações e mecanismos de atrasos entre os componentes do sistema. Por esta estrutura afetar o comportamento de todo o sistema, e sistemas relacionados, evoluiu em uma abordagem generalizada para modelagem não linear (SOPHA et al., 2010).

Modelos de dinâmica de sistemas são usualmente formulados como sistemas de alta ordem, não lineares, e possivelmente com equações diferenciais estocásticas para representar as regras de decisão de agentes, processos naturais e estruturas físicas relevantes para o objetivo do modelo (STERMAN, 2002).

Poucos modelos dinâmicos têm sido desenvolvidos para simular como a SI se desenvolve ao longo do tempo. Os princípios gerais desta abordagem são a modelagem e simulação de determinados aspectos da SI (sinergias industriais, trocas de conhecimento, materiais ou energia, processos industriais, triagem e manuseio) para antecipar os impactos de vários parâmetros (preço de mercado, taxa de aterro, entre outros), e em específico, indicadores de performance como, por exemplo, volume de material desviado do aterro e número de sinergias industriais ativas. Tais estudos são difíceis ou impossíveis de serem processados utilizando ferramentas das ciências sociais tradicionais porque os dados podem simplesmente não existir. O desenvolvimento de um modelo de SI dinâmico permite pesquisadores investigar situações particulares que não podem ser observadas de outra maneira (GHALI; FRAYRET; AHABCHANE, 2017).

A estrutura de um modelo de DS é um conjunto de estoques interconectados por um conjunto de fluxos e por uma rede de informações compartilhadas (Figura 11).

Figura 11 – Arquitetura genérica de um modelo DS.



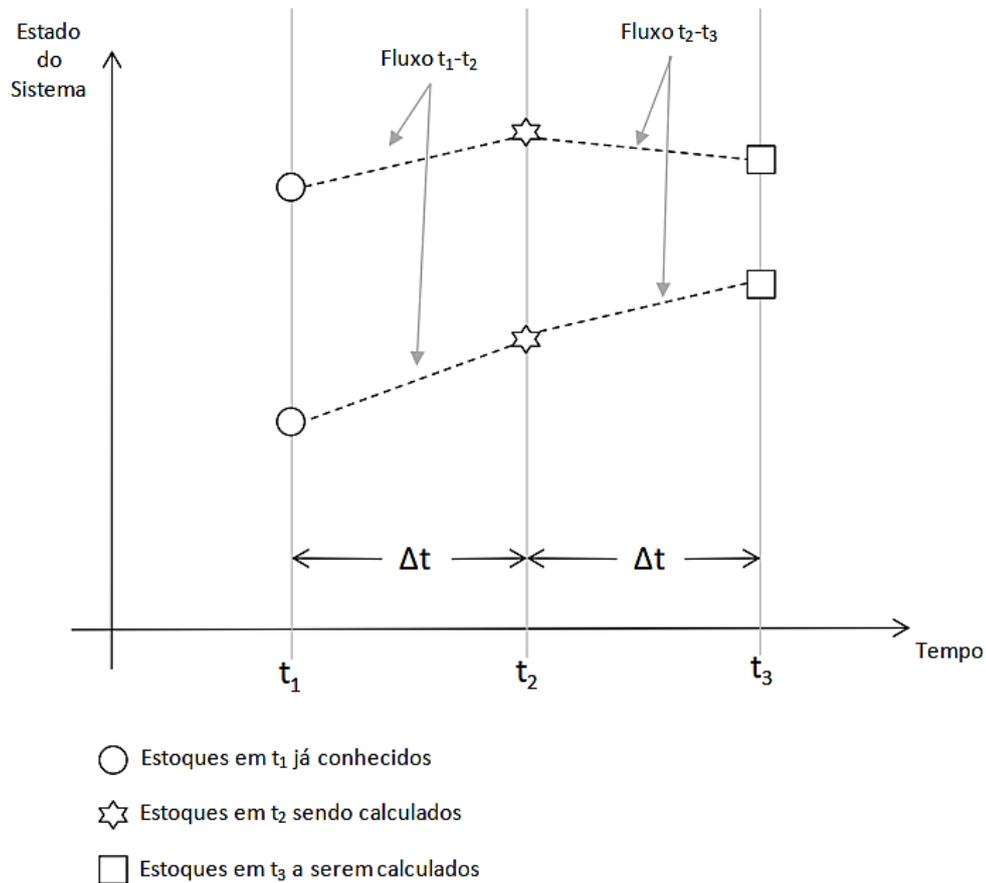
Fonte: Forrester (1968).

Para abordar o problema por DS é necessário descrever o comportamento do sistema como um conjunto de interações, balanceamento e retroalimentação. O sistema é representado em termos de estoques (material, conhecimento, pessoas, entre outros), fluxos entre estoques (também chamados de taxas) e informações que determinam e influenciam o valor desses fluxos (BORSHCHEV; FILIPOV, 2004).

A modelagem da interação entre os estoques e fluxos é representado por um sistema de equações diferenciais similares à apresentada na equação 1.

$$Estoque_t + \Delta t \times (FluxoSaída - FluxoEntrada)_{(t,t+1)} \quad (1)$$

O conjunto destas equações, em intervalos sequenciais de tempo, é capaz de representar as mudanças do sistema no tempo. A Figura 12 apresenta graficamente o cálculo lógico da Dinâmica de Sistemas.

Figura 12 – Cálculo lógico da DS.

Fonte: Forrester (1961).

A DS é diferente de outras abordagens de sistemas complexos por possuir elementos que ajudam a descrever as alterações no sistema de uma forma não linear. A base da abordagem é o reconhecimento de que qualquer estrutura de sistemas, a qual possui componentes com relações circulares, interligados e por vezes com atrasos, é frequentemente tão importante na determinação do seu comportamento quanto os próprios componentes individuais (SOPHA et al., 2010).

Neste capítulo, para fundamentar cientificamente a pesquisa, os conceitos teóricos de duas temáticas principais foram apresentados: (i) manufatura sustentável e (ii) tomada de decisão. Em relação à sustentabilidade nas indústrias, foram explorados conceitos de desenvolvimento sustentável, ecologia industrial, e resíduos sólidos, uma vez que é o enfoque do ciclo de materiais abordados por esta pesquisa. Para investigar sobre o processo de tomada de decisão e modelagem de sistemas, foram apresentados os elementos da tomada de decisão, a modelagem baseada em agentes e dinâmica de sistemas, as quais são operacionalizadas por meio de simulação para apoiar processos decisórios.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta as características e a construção da presente pesquisa. A caracterização é realizada através da descrição da concepção filosófica, do método de pesquisa e da estratégia de pesquisa. A construção da pesquisa é apresentada na seção de procedimento metodológico.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002), a pesquisa pode ser definida como o procedimento racional e sistemático que tem como propósito apresentar respostas aos problemas propostos quando não há informação suficiente para responder ao problema, ou então quando a informação disponível não se adequa ao problema. Conforme descrito por Creswell (2010), os projetos de pesquisa podem ser caracterizados de acordo com três componentes: (i) concepção filosófica; (ii) método de pesquisa; e (iii) estratégias de investigação.

3.1.1 Concepção filosófica

Apesar das concepções filosóficas por vezes estarem ocultas (SLIFE; WILLIAM, 1995), influenciam a prática e devem ser identificadas. Estas concepções são uma orientação geral sobre o mundo e sobre a natureza da pesquisa defendida (CRESWELL, 2010). Segundo Creswell (2010), podem ser definidas quatro concepções diferentes: pós-positivista, construtivista, reivindicatória ou participatória, e a pragmatista (QUADRO 3).

A pesquisa pragmática preocupa-se com as aplicações, o que funciona e as soluções para o problema (PATTON, 1990). Esta pesquisa possui como concepção filosófica o pragmatismo, por ser orientada para uma solução prática no mundo real, concentrar-se no problema de pesquisa e utilizar uma abordagem pluralística para construir conhecimento. Além disso, a presente pesquisa se apropria da *Design Science* que é apontada como orientação filosófica pragmática, por estabelecer uma ponte entre a ciência e a prática (HEVNER et al., 2004; MARCH; SMITH, 1995). Hevner et al. (2004), ao considerarem a *Design Science* uma pesquisa voltada para resolução de problemas a partir da aplicação de novos conhecimentos científicos, revelam que esta ciência é uma abordagem de pesquisa essencialmente pragmática. Pois, enquanto as demais pesquisas científicas objetivam descobrir a verdade, a ciência do *design* busca identificar o que é eficaz para a resolução do problema.

Quadro 3 – Concepções filosóficas.

Pós-positivista	Construtivista
Determinação	Entendimento
Reduccionismo	Significados múltiplos do participante
Observação e mensuração empíricas	Construção social e histórica
Verificação da teoria	Geração de teoria
Reivindicatória/ Participatória	Pragmatista
Política	Consequência das ações
Capacitação orientada para questão	Centrada no problema
Colaborativa	Pluralista
Orientada para mudança	Orientada para a prática no mundo real

Fonte: Creswell (2010).

3.1.2 Método de pesquisa

O método de pesquisa envolve as formas de coleta, análise e interpretação dos dados em estudo (CRESWELL, 2010). De acordo com Pinheiro (2010), a pesquisa pode ser definida como qualitativa, que compreende de forma detalhada os significados e características situacionais, ou quantitativa, por traduzir os fenômenos em números e para tanto, utiliza técnicas estatísticas nas análises. No entanto, segundo Creswell (2010), apesar de aparentemente serem abordagens opostas, os estudos quantitativos e qualitativos podem ser complementares, resultando no denominado estudo de método misto, pois incorpora elementos das duas abordagens.

Para Tashakkori e Creswell (2007, p. 4) “a pesquisa de métodos mistos é aquela em que o investigador coleta e analisa os dados, integra os achados e extrai inferências usando abordagens ou métodos, qualitativos e quantitativos, em um único estudo ou programa de investigação”.

Na abordagem de métodos mistos, supõe-se que a coleta de diversos tipos de dados proporciona um melhor entendimento do problema. Estas pesquisas são consideradas de natureza tanto predeterminada quanto emergente, fazem uso de questionamentos tanto abertos quanto fechados, permitem as formas múltiplas de dados baseados em todas as possibilidades, assim como análise estatística e de texto, com interpretações realizadas por meio de banco de dados (CRESWELL, 2010).

A presente pesquisa pode ser considerada de método misto, predominantemente qualitativo com aspectos quantitativos. Evidencia-se a adoção deste método, através do uso de dados tanto em formato numérico quanto na forma de significados. Os dados apresentam

características de resíduos sólidos industriais e de sistemas de simbiose industrial, baseados em pesquisas anteriores da literatura e em casos práticos, bem como expressam a análise dos dados reais do ambiente, os quais serão utilizados como base para as interpretações. Por fim, é importante ressaltar que esta pesquisa, ao utilizar a análise bibliométrica para realizar as revisões estruturadas da literatura, amplia o destaque em seu aspecto quantitativo.

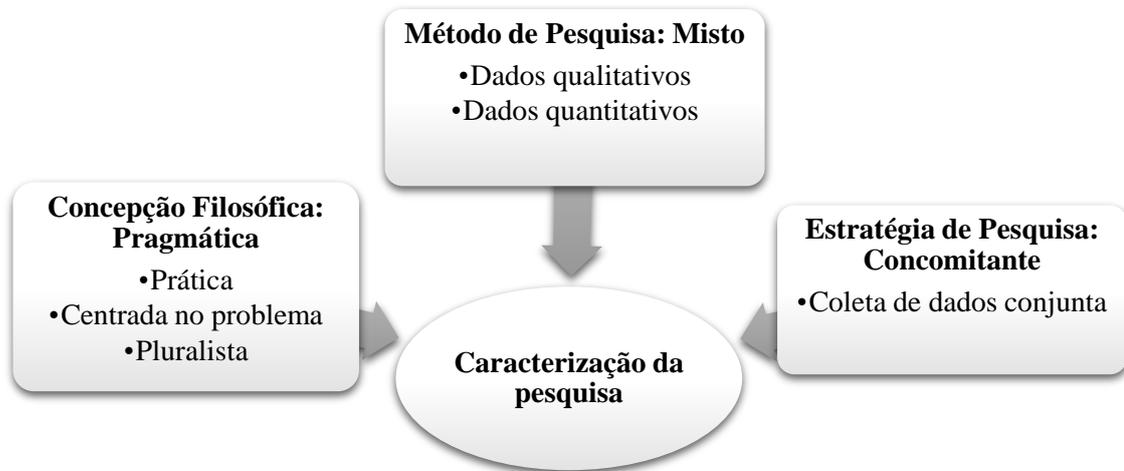
3.1.3 Estratégia de pesquisa

A estratégia de pesquisa, refere-se aos tipos de projetos ou modelos de métodos quantitativos, qualitativos e misto, que proporciona uma direção específica aos procedimentos em um projeto de pesquisa (CRESWELL, 2010). Conforme Creswell (2010) aponta, as estratégias de procedimentos de métodos mistos podem ser definidas em termos gerais em:

- Métodos mistos sequenciais – elaboração ou expansão dos achados de um método com os de outro método. É considerada uma estratégia sequencial, pois possibilita iniciar a pesquisa com dados qualitativos e seguir com quantitativos, bem como a inversão desta ordem;
- Métodos mistos concomitantes – convergência ou mistura de dados quantitativos e qualitativos para análise abrangente do problema de pesquisa. Coleta das duas formas de dados ao mesmo tempo, com posterior integração das informações para interpretação;
- Métodos mistos transformativos – utilização de um enfoque teórico como uma perspectiva ampla em um projeto que contém tanto dados quantitativos quanto qualitativos. Esse enfoque proporciona uma estrutura de interesse, métodos para coleta de dados e para os resultados ou mudanças previstas no estudo.

Em relação à estratégia, a presente pesquisa utiliza procedimentos mistos concomitantes, pois utiliza dados qualitativos e quantitativos ao mesmo tempo para análise, interpretação e consolidação do modelo. De maneira geral, conclui-se que esta pesquisa é caracterizada como pragmática, de métodos mistos e com procedimentos concomitantes (Figura 13).

Figura 13 – Caracterização da pesquisa.



Fonte: A própria autoria.

3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A presente pesquisa se baseia na *Design Science*, a qual foi introduzida pela primeira vez por Herbert Simon, em seu livro intitulado “As Ciências do Artificial”, publicado em 1969. Nesta obra, Simon (1996) apresenta as diferenças entre a ciência natural e a *Design Science*, também conhecida como a Ciência do Projeto ou Ciência do Artificial (SIMON, 1996). A ciência que procura desenvolver e projetar soluções para melhorar sistemas existentes, resolver problemas ou, ainda, criar novos artefatos que contribuam para melhorar a atuação humana, tanto na sociedade quanto nas organizações (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015).

Hevner et al. (2004) ao considerarem a *Design Science* uma pesquisa voltada para resolução de problemas a partir da aplicação de novos conhecimentos científicos, revelam que esta ciência é uma abordagem de pesquisa essencialmente pragmática. Enquanto as demais pesquisas científicas objetivam descobrir a verdade, a ciência do design busca identificar o que é eficaz para a resolução do problema. Nesse sentido, a *Design Science* valoriza a aprendizagem por meio da construção, explicitando um tipo de conhecimento diferente das abordagens científicas tradicionais, de maneira que o seu potencial de aplicação se torna facilitado (VAN AKEN, 2004).

A *Design Science Research* (DSR) operacionaliza a *Design Science*. De acordo com a DSR, o conhecimento, a compreensão e a solução de um problema são obtidos através da construção e aplicação de um artefato, constituído por um determinado número de fases para o

contexto específico. Os artefatos são projetados e criados para inserir alguma mudança em um sistema, resolvendo problemas e possibilitando um melhor desempenho do sistema como um todo. O resultado do estudo dos artefatos tem uma natureza prescritiva, voltado à solução de problemas (VAN AKEN et al., 2012). Estes artefatos são construídos pelo homem e segundo Simon (1996, p. 28) são “objetos artificiais que podem ser caracterizados em termos de objetivos, funções e adaptações. São normalmente discutidos, particularmente durante a concepção, tanto em termos imperativos como descritivos”.

Para Lacerda et. al (2013), a DSR é vista como alternativa concreta para a condução de pesquisas de cunho tecnológico (como por exemplo, tecnologias de gestão), constituindo-se em uma abordagem de rigor científico para colocar nestas áreas a inteligência universitária do país a serviço dos enormes desafios tecnológicos brasileiros.

Assim, a DSR é um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado, ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos (ÇAĞDAŞ; STUBKJÆR, 2011). Os artefatos podem ser definidos como modelos, métodos, construções e instanciações (MARCH; SMITH, 1995). A descrição de cada um destes artefatos pode ser visualizada no quadro 4.

Nesta pesquisa foi adotado como *framework* de apoio da *Design Science Research* (DSR), a proposta de Peffers et al., o qual é desdobrado em seis atividades principais. Cada uma das atividades é apresentada de forma sucinta como (PEFFERS et al., 2007):

- Identificação e motivação do problema – Definir a problemática de pesquisa específica e justificar o valor da solução. Identificar como o problema será abordado para desenvolver um artefato que possa efetivamente fornecer uma solução. Os recursos necessários para esta atividade incluem o conhecimento do estado do problema e a importância de sua solução.
- Definição dos objetivos da solução – Inferir os objetivos de uma solução a partir da definição do problema e conhecimento do que é possível e viável. Os objetivos podem ser quantitativos ou qualitativos e devem ser inferidos racionalmente a partir da especificação do problema. Os recursos necessários para isso incluem o conhecimento do estado dos problemas e soluções atuais, se houver, e sua eficácia;
- Projeto e Desenvolvimento – Criação do artefato. Esta atividade inclui determinar a funcionalidade desejada do artefato e sua arquitetura e, em seguida, criar o artefato real. Os recursos necessários nesta etapa incluem o conhecimento da teoria que pode ser levado a uma solução;

- Demonstração – Demonstrar o uso do artefato para resolver uma ou mais instâncias do problema. Pode envolver o uso de experimentação, simulação, estudo de caso, prova, ou outra atividade apropriada. Para esta atividade, os recursos necessários incluem o conhecimento efetivo de como usar o artefato para resolver o problema;
- Avaliação – Observar e medir o artefato quanto ao suporte para solucionar o problema. Esta atividade envolve a comparação dos objetivos de uma solução com os resultados reais observados do uso do artefato na demonstração. Requer conhecimentos de métricas e técnicas de análise relevantes. Dependendo da natureza do local do problema e do artefato, a avaliação pode assumir muitas formas. Pode incluir itens como uma comparação da funcionalidade do artefato com os objetivos da solução da atividade, medidas objetivas de desempenho quantitativo, como orçamentos ou itens produzidos, resultados de pesquisas de satisfação, feedback de clientes ou simulações. Ainda poderia incluir medidas quantificáveis do desempenho do sistema, como tempo de resposta ou disponibilidade. Conceitualmente, a avaliação poderia incluir qualquer evidência empírica apropriada ou prova lógica. No final desta atividade, os pesquisadores podem decidir iterar novamente a partir do passo três para tentar melhorar a eficácia do artefato ou continuar a comunicação e deixar melhorias adicionais para projetos subsequentes;
- Comunicação – Comunicar a importância do problema, a construção do artefato, sua utilidade e inovação, bem como o rigor de seu desenho e sua eficácia para pesquisadores e outros públicos relevantes, como profissionais praticantes. É possível utilizar esse processo para estruturar o artigo, assim como a estrutura nominal de pesquisa empírica (definição de problema, revisão de literatura, desenvolvimento de hipóteses, coleta de dados, análise, resultados, discussão e conclusão). Esta estrutura é comum para trabalhos empíricos de pesquisa, e sua comunicação requer conhecimento da cultura disciplinar.

Quadro 4 – Artefatos da DSR

Artefato	Descrição
Constructos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conceitos que definem o vocabulário de um domínio; ▪ Utilizados para descrever os problemas dentro do domínio e para especificar as respectivas soluções; ▪ Definem os termos usados para descrever e pensar sobre as tarefas, podendo ser extremamente valiosos tanto para os profissionais quanto para os pesquisadores.
Modelos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos; ▪ Representações da realidade que apresentam tanto variáveis de um determinado sistema quanto suas relações; ▪ Considerados uma descrição, isto é, uma representação de como as coisas são; ▪ A principal preocupação está na sua utilidade e não na aderência de sua representação da verdade. Embora um modelo possa ser impreciso sobre os detalhes da realidade, deve ter condições de capturar a estrutura geral da realidade, assegurando a utilidade.
Métodos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conjunto de passos necessários para desempenhar determinada tarefa; ▪ Podem ser representados graficamente ou encapsulados em heurísticas e algoritmos específicos; ▪ Podem estar ligados aos modelos. As etapas do método podem utilizar partes do modelo como uma entrada que o compõe; ▪ Favorecem tanto a construção quanto a representação das necessidades de melhoria de um determinado sistema; ▪ Apoiam a transformação dos sistemas em busca de melhoria; ▪ Criações típicas das pesquisas fundamentadas em Design Science.
Instanciações	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concretização de um artefato em seu ambiente; ▪ Operacionalizam outros artefatos (constructos, modelos e métodos), para demonstrar a viabilidade e eficácia dos outros artefatos; ▪ Informam como implementar ou utilizar determinado artefato e seus possíveis resultados; ▪ Podem se referir a um determinado artefato, ou a articulação de diversos artefatos, para a produção de um resultado em um contexto; ▪ Conjunto coerente de regras que orientam a utilização dos artefatos (constructos, modelos e métodos) em um determinado ambiente;

Fonte: March e Smith (1995).

O *framework* consolidado desta pesquisa para prescrever uma solução centrada no objetivo pode ser identificado na figura 14. A DSR é iterativa e permite a retroalimentação para a definição da solução. O artefato proposto por esta pesquisa é um modelo capaz de descrever situações, atividades e fluxos de materiais (MARCH; SMITH, 1995), e assim, apoiar a tomada

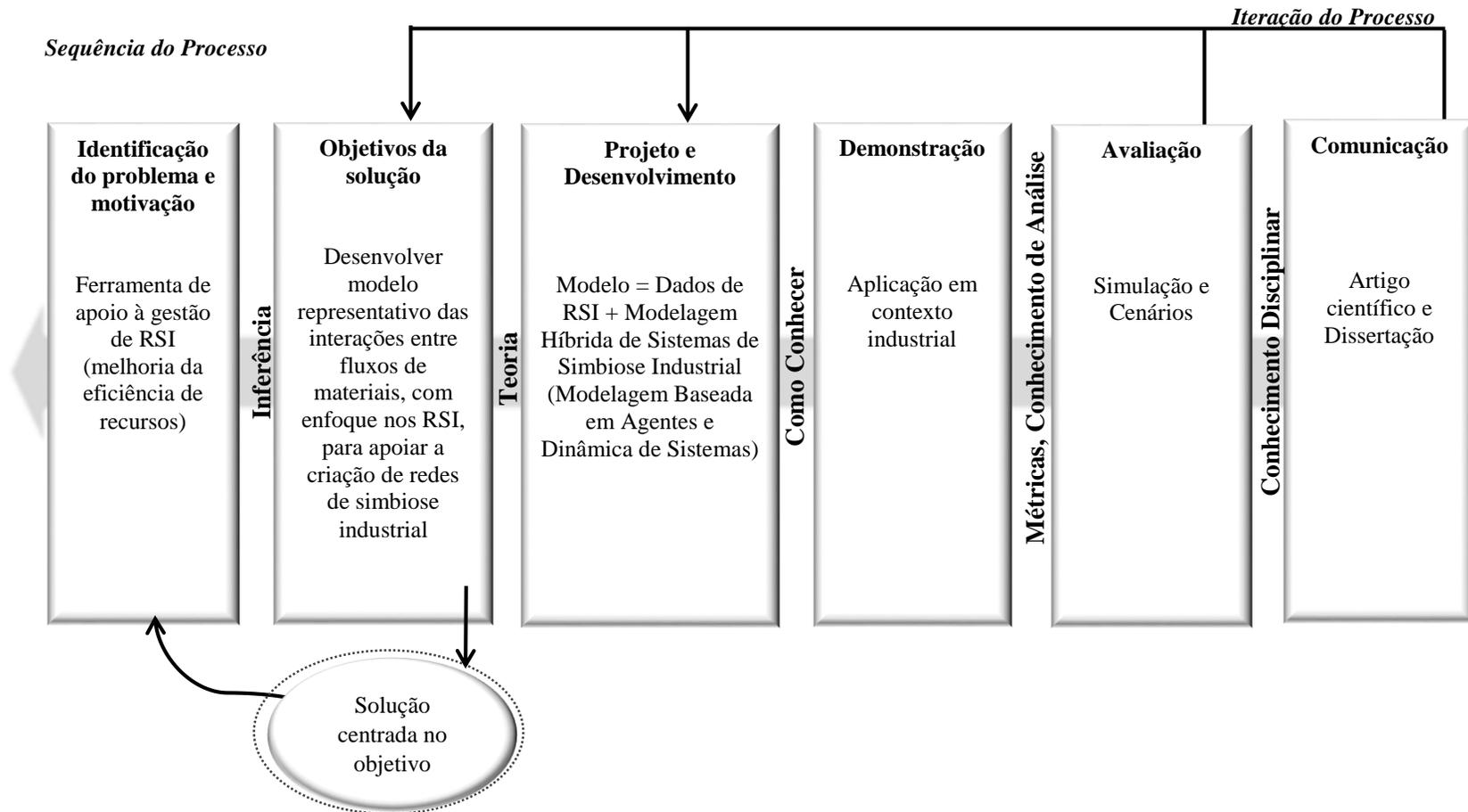
de decisão de gestores quanto ao direcionamento dos resíduos sólidos industriais a fim de estabelecer redes de simbiose industriais.

A demonstração do artefato criado será realizada no contexto industrial do Estado do Paraná. O *software* selecionado para realizar a simulação do modelo é o *Anylogic*, versão 8, licença estudantil. Esta ferramenta foi eleita por permitir a criação de modelos híbridos de simulação, com capacidade de desenvolver os paradigmas de modelagem adotados por esta pesquisa: (i) baseada em agentes, e (ii) dinâmica de sistemas. Além disso, o *software* apresenta uma excelente visualização gráfica para apoiar a tomada de decisão.

O quadro 5 apresenta as etapas da DSR associadas aos objetivos específicos, as atividades desenvolvidas nesta pesquisa, as entregas e ferramentas ou dados necessários para a realização.

Neste capítulo, a presente pesquisa primeiramente foi caracterizada dentro do escopo científico, e a seguir foi apresentado em detalhe o procedimento metodológico adotado. Como base para o desenvolvimento de pesquisas prescritivas foi utilizado o *framework* da DSR proposto por Peffers et al. (2007). As etapas da DSR foram elaboradas, associadas aos objetivos delineados por esta pesquisa e as respectivas entregas realizadas em cada etapa.

Figura 14 – Framework DSR.



Fonte: A autora com base em Peffers et al. (2007).

Quadro 5 – DSR, objetivos específicos, atividades e entregas.

Código	Objetivos Específicos	Etapa da DSR (Peffer et al. 2007)	Atividades	Entregas	Ferramentas/ Dados Necessários
a	Explorar conceitos envolvidos no tema de pesquisa para fundamentação e motivação (manufatura sustentável e tomada de decisão).	Identificação do problema e motivação.	Revisão da bibliografia e construção do projeto de dissertação.	Fundamentação teórica no projeto de dissertação.	Acesso à base de artigos científicos.
b	Analisar a literatura de forma estruturada, abordando mapeamento de fluxo de materiais e ecossistemas industriais para identificar o estado da arte e as oportunidades de pesquisa.	Identificação do problema e motivação / Definição dos objetivos da solução.	Análise bibliométrica e sistêmica.	Problematização, definição de hipóteses e objetivos de pesquisa no projeto de dissertação.	<i>Proknow-C</i> e acesso à base de artigos científicos.
c	Avaliar a modelagem de sistemas em ambientes de simbiose industrial.	Projeto e Desenvolvimento.	Nova análise bibliométrica e sistêmica para identificar características da modelagem de sistemas de simbiose industrial e oportunidades.	Características de sistemas de simbiose industrial, discussão sobre paradigmas de modelagem adequados ao modelo.	<i>Proknow-C</i> e acesso à base de artigos científicos.
d	Construir o modelo com base na <i>Design Science Research</i> (DSR) e nas informações exploradas sobre sistemas de simbiose industrial e resíduos sólidos industriais.	Projeto e Desenvolvimento.	Construção do modelo.	Descrição do escopo do modelo, desenvolvimento dos fluxos do modelo (entradas e saídas), definição dos parâmetros, funções e decisões.	Atividades b, c (dados IAP, SEMA PR, IBGE e SIMAPRO).
e	Implementar o modelo em um contexto industrial para demonstração da aplicabilidade.	Demonstração.	Descrição dos cenários de análise/ Aplicação do modelo e codificação em linguagem de simulação.	Definição dos cenários relevantes para demonstrar utilidade do artefato/ Simulação.	Atividade d e <i>Anylogic</i> .
f	Avaliar o modelo desenvolvido.	Avaliação.	Avaliação experimental do artefato com dados reais por simulação e avaliação descritiva pela construção de cenários em torno do artefato.	Avaliação do modelo.	Atividades d, e.

Fonte: A própria autoria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções subsequentes são apresentados os resultados do desenvolvimento de cada uma das etapas do *framework* da DSR para elaboração da pesquisa e construção do modelo proposto.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Esta pesquisa iniciou a partir de uma investigação na Unidade de Valorização de Resíduos (UVR), situada na cidade de Campo Magro (PR). A UVR se tornou modelo internacional na gestão de resíduos recicláveis, processando em média 10 mil toneladas de resíduos por ano, os quais retornavam para reuso em outros processos. Diante deste contexto, assume-se que iniciativas semelhantes em outras regiões poderiam apoiar o direcionamento de RSI para reuso. A partir desta motivação, foram explorados os principais conceitos que fundamentam esta pesquisa. O embasamento científico foi construído através de pesquisa na literatura abordando as temáticas de manufatura sustentável, tomada de decisão e modelagem de sistemas.

Para definir cientificamente a problemática de pesquisa, foi realizada uma análise bibliométrica e sistêmica sobre mapeamento de fluxo de materiais e ecossistemas industriais (GUEDES; PAGANIN; BORSATO, 2018). Com este intuito, foi utilizado como instrumento o *Knowledge Development Process – Constructivist (ProKnow-C)* delineado por Ensslin, Ensslin e Pinto (2013).

Através desta análise foi possível identificar os principais problemas de pesquisa abordados na literatura, os métodos adotados para mapear fluxo de materiais e as oportunidades de pesquisa. Definiu-se a escassez de ferramentas práticas para apoiar melhorias nos fluxos de materiais em sistemas complexos como oportunidade de pesquisa a ser explorada. Desta forma, pretende-se apoiar à gestão de RSI para melhorar a eficiência de recursos.

4.2 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS DA SOLUÇÃO

Esta pesquisa inicia a partir da busca de uma solução centrada no objetivo de apoiar a tomada de decisão de gestores para melhorar a eficiência dos fluxos de materiais, pelo direcionamento dos resíduos sólidos industriais para estabelecer redes de simbiose industrial. Para

tanto, desenvolve um modelo representativo destas interações. A necessidade de melhoria da eficiência do ciclo dos materiais é abordada através da redução do consumo de recursos naturais, a minimização do impacto ambiental da produção e da destinação de resíduos sólidos industriais, bem como da manutenção do benefício econômico.

4.3 PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A etapa do projeto e desenvolvimento é a efetiva construção do artefato. Para a construção do modelo foi utilizada como embasamento a análise da literatura sobre mapeamento de fluxo de materiais e ecossistemas industriais, bem como a coleta de informações sobre RSI com dados provenientes de legislações, normas, manuais, relatórios e documentos referentes a esta classe de resíduos.

Nesta etapa, considerando-se a iteratividade da DSR e necessidade de exploração em profundidade sobre modelagem de sistemas e ecologia industrial, foi executada uma nova análise estruturada da literatura para avaliar a modelagem de sistemas para simbiose industrial e apoiar o desenvolvimento do modelo (GUEDES; DE SOUZA; BORSATO, 2019). O objetivo foi definir as características de um sistema de simbiose industrial e os principais paradigmas de modelagem adequados a este sistema para definições do escopo do modelo.

Para a construção do modelo, esta pesquisa utilizou três grandes etapas do desenvolvimento de estudos de modelagem e simulação, definidas por Montevechi et al. (2010) e Chwif & Medina (2010): (i) concepção, (ii) implementação, e (iii) análise. Ressalta-se que as etapas de implementação e análise, referem-se, respectivamente, às etapas de demonstração e avaliação da DSR.

A primeira etapa para a construção de um modelo é a concepção. Esta etapa é uma abstração da realidade e permite delimitar o sistema, definir os objetivos da pesquisa, o escopo e o nível de detalhe para o modelo (ROBINSON, 2008). A concepção é a mais importante e trabalhosa fase do projeto de modelagem, já que sua construção requer muita atenção para que o modelo conceitual represente o sistema (CHWIF; MEDINA, 2010; PEREIRA; MONTEVECHI; MIRANDA, 2013; ROBINSON, 2008).

Para a concepção inicial do modelo, o quadro 6 apresenta de forma consolidada as questões levantadas e respondidas com a finalidade de apoiar a formulação e análise do problema.

Quadro 6 – Questões e respostas iniciais para construção do modelo.

Questões levantadas	Respostas
Qual o problema abordado?	A necessidade de melhoria da eficiência do ciclo dos materiais através da redução do consumo de recursos naturais, a minimização do impacto ambiental da produção e da destinação de resíduos sólidos industriais, bem como da manutenção do benefício econômico.
Por que o problema está sendo estudado?	Identificou-se na prática, através da UVR, a demanda por apoio aos gestores na tomada de decisão quanto ao direcionamento dos fluxos de RSI. Assume-se que iniciativas semelhantes em outras regiões podem ser benéficas para os sistemas industriais. E ainda, por meio da literatura, foi comprovada a recorrência desta problemática. Além disso, pretende-se preencher a lacuna de pesquisa quanto à escassez de ferramentas práticas para apoiar melhorias nos fluxos de materiais em sistemas complexos.
Quais são as respostas que o estudo espera alcançar?	O estudo espera permitir a visualização do sistema, assim como avaliar as dinâmicas dos cenários e identificar as especificidades de cada um para apoiar a tomada de decisão. As respostas esperadas pelo modelo estão associadas à redução do consumo de recursos naturais, ao impacto ambiental da produção e da destinação de resíduos sólidos industriais, e também aos impactos econômicos.
Quais são os critérios para avaliação da performance do sistema?	Para avaliar a performance do sistema serão utilizados os impactos ambientais e econômicos.
Quais são as hipóteses e prerrogativas?	H1: Indústrias produzindo isoladamente apresentam alto benefício econômico, com maior impacto ambiental; H2: Indústrias produzindo com troca de materiais entre si, podem manter o benefício econômico, com menor impacto ambiental; H3: Entrada de uma UVR pode apoiar no ciclo de materiais;
E que restrições e limites são esperados das soluções obtidas?	Uma vez que há restrição de acesso a todos os dados reais, para a simulação serão utilizados também dados adaptados. Estes dados serão coletados por meio de pesquisa bibliográfica e documental, e tratados para que se aproximem da realidade. O intuito do modelo é ser genérico, desta forma a estrutura e lógica de programação não se alteram e poderá ser retroalimentado com um banco de dados específico.

Fonte: A autora com base em Freitas Filho (2008).

O modelo desenvolvido pretende ser genérico para viabilizar o ajuste conforme as necessidades de alterações no sistema. O enfoque está na previsão dos impactos ambientais e econômicos gerados ao estabelecer ambientes de simbiose industrial para assim apoiar a decisão de gestores quanto ao direcionamento dos RSI.

O planejamento de cenário foca no ambiente externo e identifica os fatores que influenciam o desenvolvimento da organização e ajudam a entender o ambiente organizacional, reconhecendo oportunidades, avaliando alternativas estratégicas e possibilitando a tomada de decisão em longo prazo (ASSEN, 2010; DYSON, 2004). A criação dos cenários pretende comparar a evolução dos desempenhos ao longo do tempo e permitir a identificação do consumo de recursos (matéria-prima virgem e energia), da geração de resíduos, da emissão de CO₂ para o ambiente, e do lucro econômico obtido.

Desta forma, os cenários propostos para avaliar o sistema estão apresentados no quadro 7. As propostas de alterações foram elaboradas para avaliar a evolução do comportamento das indústrias e o impacto no sistema em termos econômicos e ambientais.

Quadro 7 – Cenários de simulação do modelo.

Cenários	Descrição dos cenários estudados	Motivação
C1	Indústrias produzem linearmente (sem interação, sem simbiose industrial).	Avaliar a evolução da produção industrial, sem colaboração entre indústrias, em termos ambientais e econômicos.
C2	Indústrias produzem trocando materiais entre si com o apoio de uma Unidade de Valorização de Resíduos (com ligação indireta).	Avaliar o impacto ambiental e econômico no sistema com a abertura de uma UVR para apoiar a realização das trocas de materiais entre indústrias.
C3	Indústrias produzem trocando materiais entre si (com ligação direta).	Avaliar como a adoção da estratégia de troca de materiais (RSI) entre indústrias, conectadas diretamente, impacta no sistema em termos ambientais e econômicos.

Fonte: A própria autoria.

Os cenários de redes industriais podem ser considerados como sistema de produção linear, com conexão indireta e com conexão direta. O cenário 1 propõe a avaliação dinâmica da evolução das indústrias quando estão produzindo isoladamente, sem interação simbiótica. O cenário 2 avalia o impacto ambiental e econômico no sistema com a abertura de uma UVR para apoiar a realização

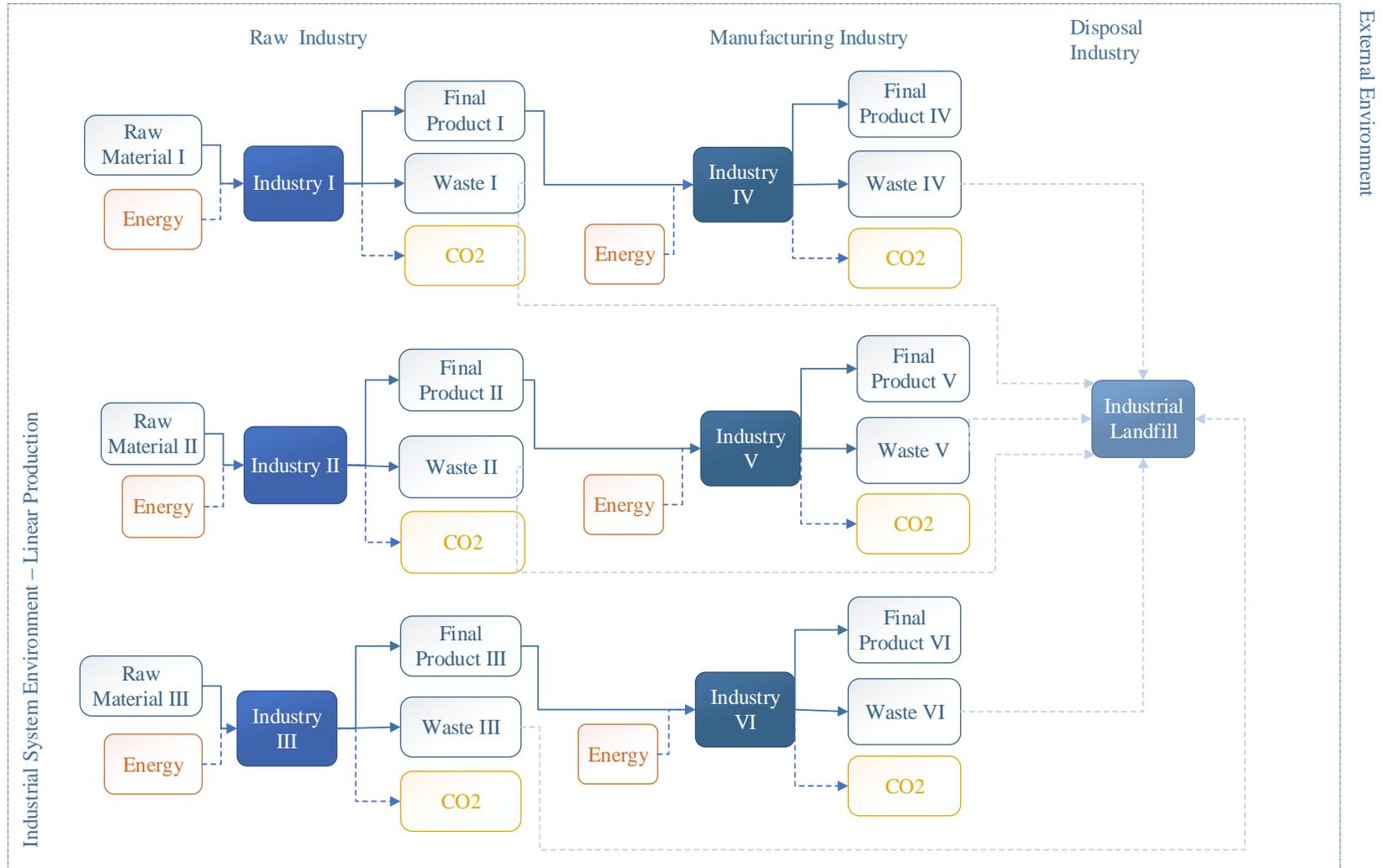
das trocas de materiais entre indústrias. O cenário 3 permite avaliar como a adoção da estratégia de troca de materiais (RSI) entre indústrias, conectadas diretamente, impacta no sistema em termos ambientais e econômicos. As figuras 15, 16 e 17 apresentam essa representação dos cenários de evolução da rede industrial 1, 2 e 3.

A elaboração do modelo conceitual consiste no desenvolvimento de esquemas e gráficos, definição de componentes, variáveis e interações lógicas que constituem o sistema (FREITAS FILHO, 2008). O modelo conceitual auxilia nos pontos de coleta de dados de entrada e permite agilizar a criação do modelo computacional (SILVA et al., 2015). Há uma interação contínua entre a construção do modelo conceitual e a identificação dos dados necessários (BANKS et al., 2000). A modelagem conceitual é capaz de aumentar a qualidade do modelo e reduzir o tempo necessário na fase de implementação computacional (PERERA; LIYANAGE, 2000; SILVA et al., 2014).

O modelo conceitual desta pesquisa está embasado no modelo de Ecologia Industrial de Graedel e Allenby (2010), que apresenta uma analogia da visão ideológica do desenvolvimento da evolução de sistemas e é fundamental para entender como a sustentabilidade pode ser atingida. Pode-se definir que o escopo do sistema modelado adota as perspectivas geográfica e setorial (BOONS; BASS, 1997; CHERTOW, 2007). A perspectiva geográfica utiliza fronteiras naturais ou políticas como, por exemplo, de Kalundborg, na Dinamarca. Já a perspectiva setorial traça a fronteira em torno dos atores envolvidos em atividades industriais semelhantes (BALDWIN et al., 2004). Além disso, o modelo pretende atender o nível de simbiose industrial representado pelo fluxo de materiais entre indústrias organizadas “virtualmente” em uma região mais ampla, descrito por Chertow (2000). O intuito é permitir que os benefícios da simbiose industrial sejam expandidos para abranger uma comunidade econômica regional, na qual o potencial para a identificação de trocas de subprodutos aumenta consideravelmente.

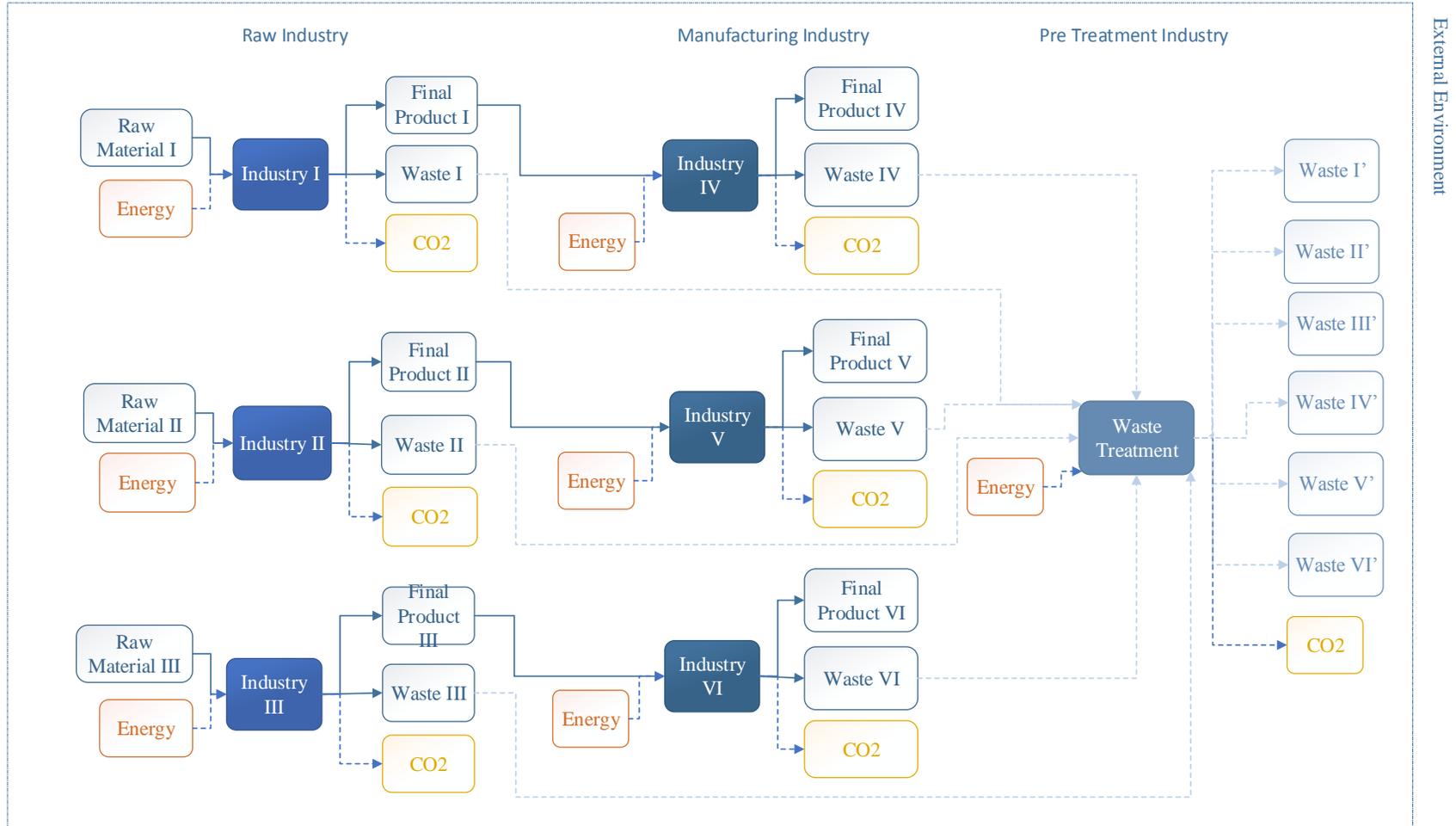
Para abordar a dinâmica e evolução de um ambiente de simbiose industrial, bem como a complexidade envolvida, a modelagem adotada é híbrida, pois considera os dois principais paradigmas de modelagem e simulação para este contexto: (i) a modelagem baseada em agentes e (ii) a dinâmica de sistemas. A produção industrial será representada através da dinâmica de sistemas para considerar os fluxos de material e os retornos de um ponto de vista agregado. A DS aponta a tendência e o comportamento do nível do sistema explicitamente e intuitivamente. Por meio da MBA o comportamento do sistema emerge.

Figura 15 – Sistemas de produção industrial linear.



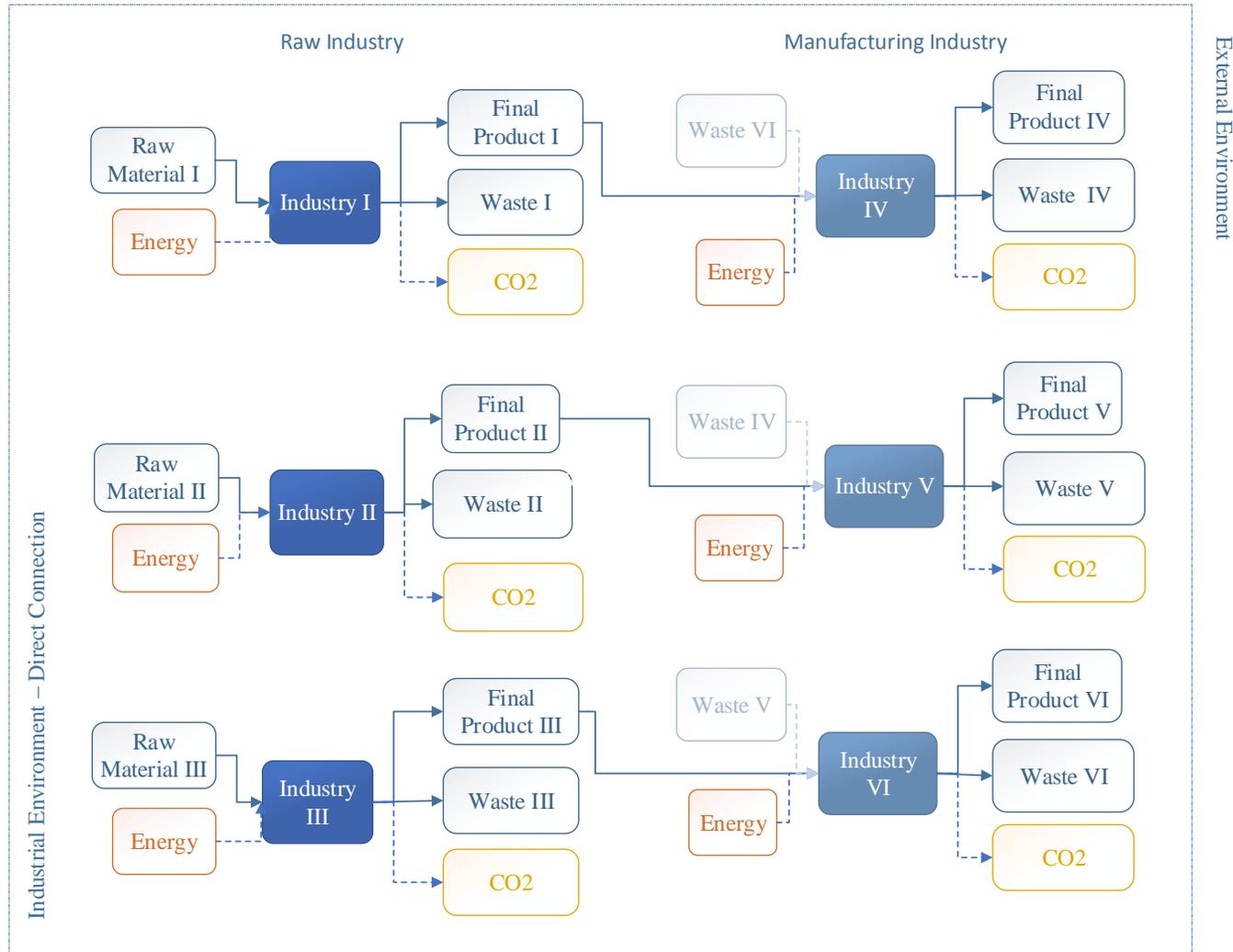
Fonte: A própria autoria.

Figura 16 – Sistemas de rede industrial com conexão simbiótica indireta.



Fonte: A própria autoria.

Figura 17 – Sistemas de rede industrial com conexão simbiótica direta.



Fonte: A própria autoria.

Desta maneira, o modelo proposto é considerado um modelo híbrido. Nas figuras 18 e 19 é apresentada a consolidação da estrutura conceitual do modelo proposto.

A concepção do modelo assume uma abordagem de entrada e saída para evidenciar as interações entre fluxos de materiais das indústrias. De acordo com Albino e Kuhtz (2004), os modelos de entrada e saída são úteis porque permitem analisar os fluxos de consumo de recursos e o destino de subprodutos e fluxos de resíduos.

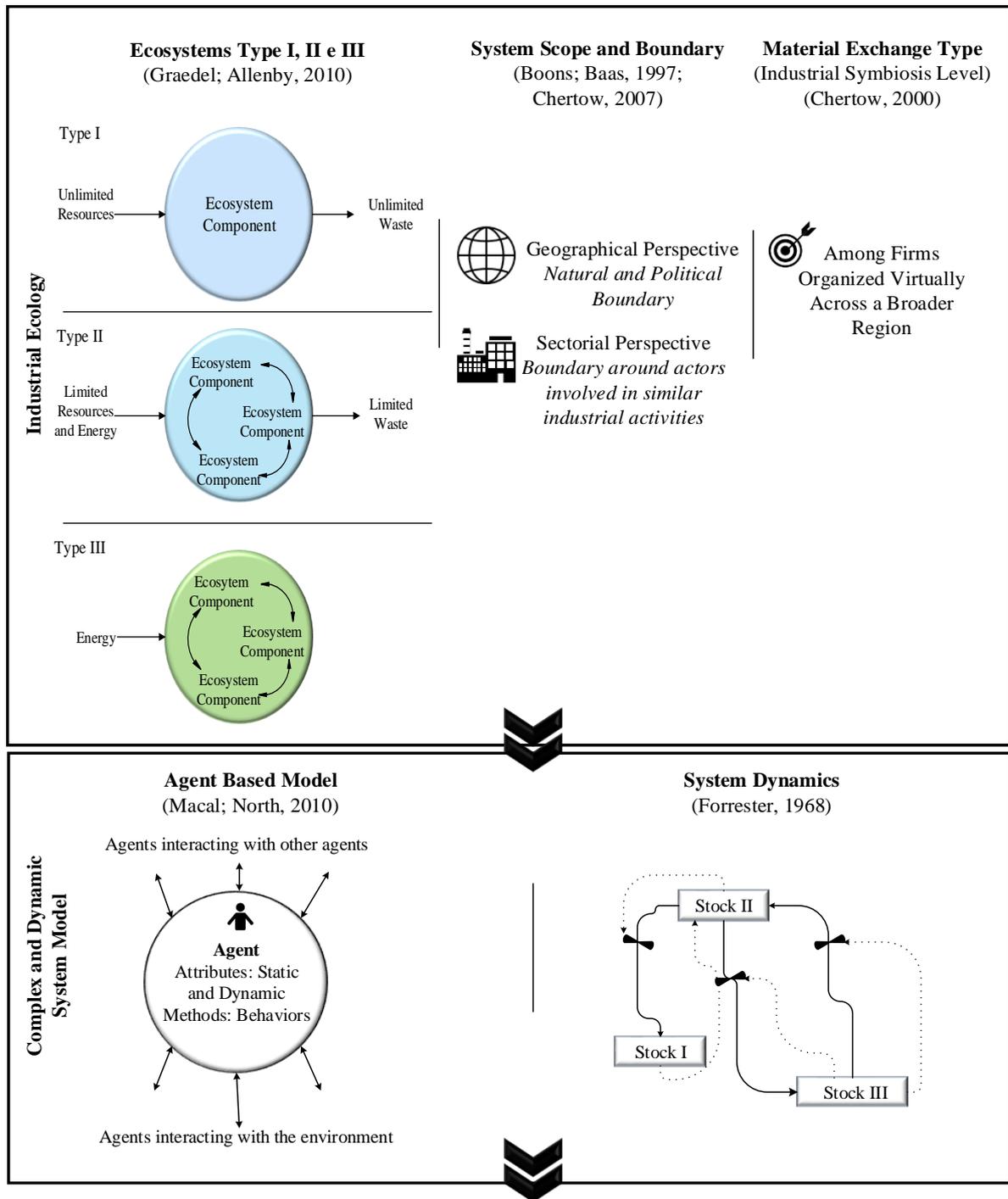
O sistema industrial é representado por entradas de matéria-prima e energia, e saídas de produto final, resíduos e emissões para o ar (CO₂). Pretende-se com o sistema representar a criação de um ambiente industrial que incorpore as principais características de uma rede de simbiose industrial dinâmica, melhorando o fluxo de materiais através das trocas entre indústrias.

Uma rede de simbiose industrial é desenvolvida a partir de indústrias que inicialmente não operam de forma cooperativa. Assim, inicialmente detecta as possíveis relações de cooperação com base nos atributos e comportamentos de cada indústria e, em seguida, formaliza as relações possíveis. Além disso, deve ser capaz de se adaptar às mudanças internas da rede relacional (comportamento e relacionamento entre indústrias), bem como aos impactos externos gerados com o meio.

No modelo proposto foram definidos 2 tipos principais de unidades industriais. O primeiro tipo, refere-se às indústrias que fornecem produtos beneficiados como matéria-prima para a produção, e o segundo, às indústrias de manufatura que realizam a transformação em produtos acabados, os quais podem ser bens de consumo ou bens de produção. Outras duas unidades foram definidas, uma unidade de pré-tratamento de resíduos e um aterro industrial. A unidade de pré-tratamento é uma usina que realiza a valorização mecânica e semiautomática dos resíduos sólidos industriais para reuso em outras atividades. Nesta unidade são realizadas atividades de segregação, compactação e armazenagem. E o aterro industrial é o local apropriado para o descarte de material industrial dos mais variados segmentos.

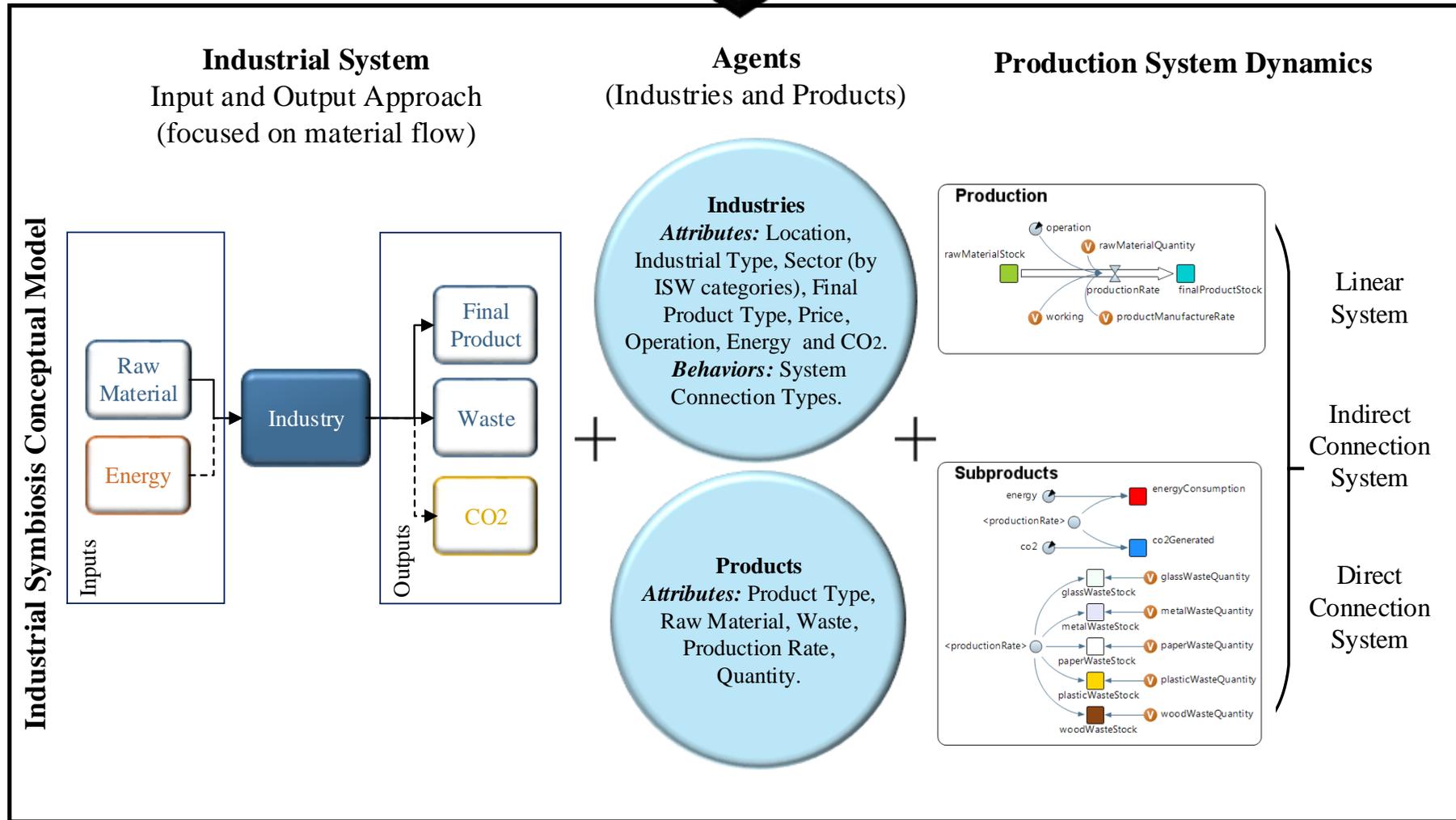
Os produtos do modelo são definidos como produto final, matéria-prima e resíduo. O tipo de matéria-prima utilizada e os resíduos gerados estão relacionados ao produto final, assim como a quantidade de energia utilizada para a produção e a quantidade de emissões de CO₂ para o ambiente.

Figura 18 – Modelo Conceitual de Simbiose Industrial.



Fonte: A própria autoria.

Figura 19 – Modelo Conceitual de Simbiose Industrial.



Fonte: A própria autoria.

Como o modelo apoia no direcionamento de RSI foi definido que as indústrias de manufatura geram RSI designados de classe II, por serem considerados não perigosos e com capacidade de retornar ao sistema como material de entrada. Estes resíduos foram subdivididos em cinco categorias principais: papel (A), plástico (B), metal (C), madeira (D), e vidro (E). O resíduo gerado pela produção no sistema poderá ser enviado para: (i) aterro industrial, (ii) reuso em outra indústria, (iii) ou pré-tratamento em uma unidade de valorização de resíduos para posterior reuso.

No quadro 8 são apresentados os agentes que fazem parte do sistema modelado, com seus respectivos atributos e comportamentos, categorizados em industriais, produtos, caminhão e ordens. Os atributos de cada agente foram definidos para descrever o sistema industrial baseado na abordagem de entrada e saída de fluxo de material. Também foram criados com o intuito de permitir a interação entre os agentes e apresentar as informações do sistema referentes ao consumo de recursos (matéria-prima e energia), a geração de resíduos, a emissão de CO₂ e ao impacto econômico.

Desta forma, aos agentes industriais foram atribuídas características de localização, tipo de produto final gerado, preço, operação, consumo de energia, emissões de CO₂ e qualidade dos materiais, taxas de pré-tratamento e de disposição final. Os comportamentos destes agentes são representados por estados de operação que indicam produzindo (normal), solicitando matéria-prima (fazendo pedido), ou parado. Os agentes produtos são definidos pelo tipo de produto manufaturado, da matéria-prima utilizada e dos resíduos gerados por cada indústria, sendo estas características atreladas a cada setor industrial. Assim, cada produto tem sua tipificação, quantidades e taxa de produção.

Os estados dos agentes caminhões podem seguir 3 fluxos diferentes, com base na localização inicial para a movimentação: (i) na indústria de manufatura, (ii) na indústria de matéria-prima, ou (iii) na indústria de pré-tratamento. Em cada um dos fluxos o caminhão realiza o carregamento do material, movimenta-se para o agente cliente, descarrega o material e retorna para a localização de origem. As ordens de pedido de matéria-prima e envio de resíduo disparam solicitações para as indústrias. As indústrias podem escolher comprar a matéria-prima entre vários fornecedores alternativos, assim como enviar o resíduo para aterro industrial, para outra indústria, ou para uma unidade de pré-tratamento. A escolha é realizada considerando o benefício econômico e ambiental do sistema.

Quadro 8 – Agentes do modelo proposto.

Categorias	Agentes	Atributos	Comportamentos
Indústrias	Indústria de Manufatura	Localização, tipo de produto final, preço, operação, energia, CO ₂ e qualidade dos materiais.	Estados de operação (normal, fazendo pedido e parado).
	Indústria de Beneficiamento (matéria-prima virgem)	Localização, tipo de produto final, preço, operação, energia, CO ₂ .	Estados de operação (normal e parado).
	Pré-Tratamento de Resíduos	Localização, preço, operação, taxas de tratamento, energia e CO ₂ .	Estados de operação (normal e parado).
	Aterro Industrial	Localização, preço, operação, taxa de disposição, energia e CO ₂ .	Estados de operação (normal e parado).
Produtos	Produto	Tipo de produto, matéria-prima e resíduos, taxa de produção, quantidades de matéria-prima e resíduos.	
Caminhão	Caminhão	Localizado na indústria, localizado na indústria de beneficiamento, Localizado na indústria de pré-tratamento, ordem de resíduo e ordem de matéria-prima.	Estados de movimentação a partir da localização inicial (na indústria de manufatura, na indústria de matéria-prima, no tratamento de resíduos)
Ordens	Ordem de pedido de matéria-prima	Cliente, matéria-prima e quantidade.	
	Ordem de envio de resíduo	Instalação do aterro e quantidade.	
	Ordem de envio de resíduo para tratamento	Instalação de tratamento, quantidade e produto.	

Fonte: A própria autoria.

Para representar a dinâmica de produção das indústrias é utilizado o sistema de equações diferenciais de 2 a 11.

$$(Taxa\ de\ Produção)_t = Utilização * (Produto\ Final)_t \quad (2)$$

$$(Produto\ Final)_{t+dt} = (Produto\ Final)_t + (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (3)$$

$$(Matéria\ Prima)_{t+dt} = (Matéria\ Prima)_t - (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (4)$$

$$(Energia)_{t+dt} = (Energia)_t * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (5)$$

$$(CO2)_{t+dt} = (CO2)_t * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (6)$$

$$(Papel)_{t+dt} = (Papel)_t + (Taxa\ Geração\ Papel) * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (7)$$

$$(Plástico)_{t+dt} = \quad (8)$$

$$(Plástico)_t + (Taxa\ Geração\ Plástico) * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt$$

$$(Madeira)_{t+dt} = \quad (9)$$

$$(Madeira)_t + (Taxa\ Geração\ Madeira) * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt$$

$$(Metal)_{t+dt} = (Metal)_t + (Taxa\ Geração\ Metal) * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (10)$$

$$(Vidro)_{t+dt} = (Vidro)_t + (Taxa\ Geração\ Vidro) * (Taxa\ de\ Produção)_t * dt \quad (11)$$

As indústrias estão fornecendo, ou demandando recursos, e gerando resíduos. A lógica de decisão dos agentes industriais está atrelada a compra de matéria-prima e ao direcionamento dos resíduos, a qual é representada pela Figura 20.

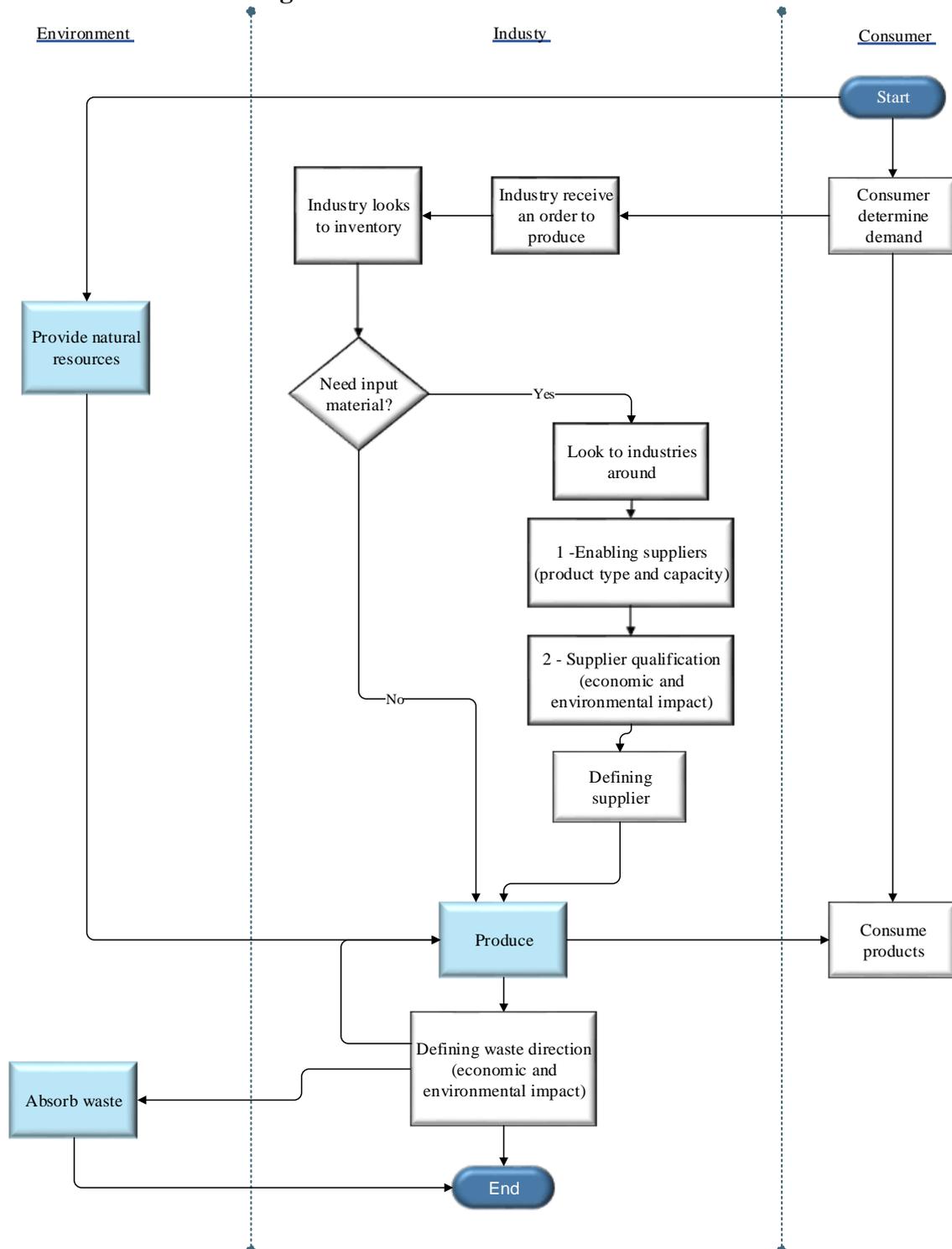
Cabe ressaltar que o modelo foi construído de modo a simplificar a interação usuário-máquina, para que as análises do tipo “o que se” (*what-if*), comuns em modelos de simulação, sejam de fácil e simples execução. No modelo de simulação, as análises *what-if* são de uso simples, pois quando há necessidade de modificação nos valores das taxas e variáveis, novos resultados são gerados para posterior análise por parte dos gestores. Uma das facilidades desse tipo de análise é a geração de gráficos comparativos com os resultados dos vários cenários simulados.

Na etapa de habilitação, o modelo seleciona os possíveis fornecedores de acordo com o tipo de produto demandado e a capacidade de produção. Na sequência, inicia a etapa de qualificação, na qual é realizada a avaliação econômica e ambiental. Para tanto, foi necessário identificar os critérios de seleção de fornecedores através de uma análise sistêmica da literatura. A escolha de fornecedores envolve a avaliação de um grupo de parceiros para a aquisição de um determinado produto, ou serviço, baseado em um conjunto de critérios predefinidos (CHOUDHRAY; SHANKAR, 2013).

A tomada de decisão é complexa, pois os critérios envolvidos no processo decisório podem apresentar caráter qualitativo e quantitativo (SANAYEI et al., 2008; SAWIK, 2010).

Pesquisas apontam que os critérios com uso mais frequentes para a seleção de fornecedores são: (i) qualidade, (ii) entrega, e (iii) preço (DARGI et al., 2014; FLORENT; ZHEN, 2010; LIMA JUNIOR; OSIRO; CARPINETTI, 2013; WEBER; CURRENT; BENTON, 1991; YAMAGUTI, 2008).

Figura 20 – Fluxo de decisão do Modelo.



Fonte: A própria autoria.

No entanto, as atuais preocupações com a sustentabilidade passaram também a incorporar nos processos de seleção de fornecedores os denominados critérios “verdes” (HASHEMI; KARIMI; TAVANA, 2015; JABBOUR; JABBOUR, 2009; JAIN; SINGH; MISHRA, 2013; KANNAN; GOVINDAN; RAJENDRAN, 2015; LUTHRA et al., 2017; PROSMAN, 2018; TSENG; BUI, 2017; YAZDANI et al., 2017).

Para a avaliação econômica são considerados como critérios o preço do produto, a distância até o fornecedor, e a qualidade do produto. Assume-se que os custos de produção de cada produto estão embutidos no preço final de cada unidade. Para a avaliação ambiental, a qualidade do produto, as emissões de CO₂ e o consumo de energia são levados em consideração. Na etapa de decisão do fluxo de direcionamento dos RSI, o modelo segue a mesma lógica de avaliação dos impactos econômicos e ambientais.

O custo do transporte de resíduos gerados por empresas de pequeno e médio porte, situadas distantes de unidades de tratamento pode ser mais elevado que o custo do tratamento em si, considerando a quantidade de resíduos a serem tratados. Neste sentido, o transporte é apontado como elo crítico na cadeia de serviços relacionados aos resíduos industriais (PwC, 2006). Na visão das grandes empresas, o principal fator para induzir as pequenas e médias geradoras a adotar práticas adequadas de tratamento e disposição de resíduos é a fiscalização. Os custos de tratamento e disposição são um obstáculo e muitas empresas deste porte não tem conhecimento técnico do assunto. Outro entrave para as pequenas e médias empresas geradoras de resíduos é a distância das unidades de tratamento que, em geral, estão localizadas nas proximidades de grandes polos industriais (IPEA, 2012).

A definição de fornecedores apropriados e o direcionamento dos RSI envolvem a troca de atributos alternativos através de pontuação. A primeira pontuação está relacionada aos impactos econômicos e as outras duas aos impactos ambientais. Para o cálculo da pontuação, esta pesquisa utiliza o modelo de ponderação linear. De acordo com De Boer, Labro e Morlacchi (2001), dentre os modelos de tomada de decisão, a ponderação linear é a mais simples, a mais aplicada pelas empresas e descrita na maioria dos livros textos de suprimentos.

O cálculo envolve a atribuição de peso a cada critério de acordo com a sua importância e a atribuição de uma nota a cada critério. O modelo pode ser descrito pela formulação apresentada em 12.

$$A_j = \sum_{i=1}^n a_i b_{ij} \quad , \text{ onde} \quad (12)$$

$A_j = \text{Nota global do fornecedor } j$

$a_i = \text{Peso atribuído ao critério de avaliação } i$

$$b_{ij} = \text{Nota de performance no critério de avaliação } i \text{ para o fornecedor } j$$

$$n = \text{Número de critérios de avaliação}$$

Para definir os pesos para cada critério, esta pesquisa utilizou como técnica o Processo de Hierarquia Analítica (AHP), proposto por Saaty (1980). Frequentemente, utiliza-se este processo para estruturar e modelar um problema de tomada de decisão com vários critérios de seleção de fornecedores. A validade deste processo está baseada em inúmeras aplicações reais pelos tomadores de decisão (CHAN et al., 2007; GHONIEM, 2011; ISHIZAKA; PEARMAN; NEMERY, 2012; MAFAKHERI; BRETON; ORDOOBADI, 2010). Uma importante vantagem do AHP é sua capacidade de lidar com critérios qualitativos e quantitativos (SAATY, 1980). Ressalta-se que devido ao objetivo de determinar pesos aos critérios previamente selecionados, o AHP foi desenvolvido até o ponto em que apresenta esta definição, o vetor de prioridades (QUADRO 9). Para esta construção, considerou-se a pesquisa desenvolvida por Yamaguti (2008) que apresenta um estudo sobre as atividades de qualificação e avaliação de fornecedores realizado em 10 grandes indústrias brasileiras.

Nesta pesquisa, o produto final possui uma qualidade que está atrelada à origem do material de entrada na indústria para ser processado. Adota-se a definição de Iacovidou, Velenturf e Purnell (2019), que descrevem a qualidade como a funcionalidade descrita pelas características inerentes do material que o torna adequado para a aplicação, medida em relação às propriedades necessárias para garantir bom desempenho e segurança nos locais específicos.

Quadro 9 – Critérios e prioridades.

Critérios	Vetor Prioridades (Pesos)
Custo	0,25
Qualidade	0,58
Entrega	0,11
Fatores Ambientais	0,06

Fonte: A própria autoria.

A qualidade de produtos produzidos com matéria-virgem e aqueles recuperados a partir de resíduos é definida e percebida de maneira diferente por cada parte interessada no sistema. As medidas de qualidade variam entre os diferentes setores e materiais, componentes e produtos produzidos. Essas medidas podem ser arbitrariamente definidas com base em uma combinação

de expectativas das partes interessadas sobre quais propriedades a qualidade deve refletir (IACOVIDOU; VELENTURF; PURNELL, 2019).

Na maioria dos casos, os materiais virgens requerem mais energia e causam mais poluição do que os materiais reciclados (VOGTLÄNDER; BREZET; HENDRIKS, 2001). No entanto, os fabricantes relutam em reparar produtos, usar componentes recuperados e/ou materiais reciclados, ostensivamente por causa de sua menor qualidade percebida, em oposição a novos materiais e componentes; além disso, porque pode colidir com os modelos de negócios típicos dependentes da venda de novos produtos de reposição (IACOVIDOU; VELENTURF; PURNELL, 2019).

Quanto à qualidade do material reciclado, assume-se que um material reciclado de maior qualidade é mais provável que seja transformado em produtos de maior qualidade. Para tanto, a qualidade dos resíduos reciclados refere-se a retenção máxima de valor para a produção de produtos de alta qualidade.

Uma vez que o modelo proposto enfoca na criação de redes de simbiose industrial que possuem como objetivo reduzir o impacto ambiental gerado pelas indústrias, a qualidade de um produto está atrelada diretamente à redução na emissão de CO₂ e do uso de energia. Assim, foram atribuídas as notas apresentadas no quadro 10 à qualidade do produto.

Quadro 10 – Nota de qualidade dos produtos.

Qualidade Produto	Nota
Matéria- prima virgem	1,0
Material pré-tratado	0,7
Material de outras indústrias	0,5

Fonte: A própria autoria.

O modelo realiza a escolha dos fornecedores e do direcionamento de RSI seguindo o fluxo das pontuações apresentadas nas fórmulas 13, 14 e 15.

$$Pontuação\ 1 = Distância * Peso + Preço * Peso + Qualidade * Peso \quad (13)$$

$$Pontuação\ 2 = \frac{Emissão\ CO_2}{Qualidade} * Peso \quad (14)$$

$$Pontuação\ 3 = \frac{Consumo\ de\ Energia}{Qualidade} * Peso \quad (15)$$

Vale ressaltar que as heurísticas de construção e contingenciais são saídas das etapas de desenvolvimento e avaliação do artefato que servirão como referências para pesquisas futuras e, portanto, precisam ser genéricas. A generalização permite que o conhecimento gerado em uma situação específica possa, posteriormente, ser aplicado a outras situações similares e que são enfrentadas por diversas organizações (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015, p. 133).

4.4 DEMONSTRAÇÃO

Para demonstrar o modelo foram selecionadas indústrias localizadas no estado do Paraná. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2016), o estado do Paraná em 2016 apresentou um Produto Interno Bruto (PIB) industrial de R\$90,3 bilhões, que representa 7,8% do PIB industrial do país. O Estado conta com 42.100 empresas industriais, as quais referem-se à 25,7% de participação no PIB do estado em 2016.

Em relação aos resíduos gerados pelas indústrias do estado, de acordo com o inventário de RSI (IAP, 2016) apontado no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS PR) (PARANÁ, 2017), 36,1% dos resíduos sólidos industriais de classe II (não perigosos) tem como destinação total declarada, a reutilização, reciclagem e recuperação, através de sucateiros intermediários ou outras formas de reutilizar, reciclar ou recuperar. E apenas 3% destes resíduos, tem como destinação a reutilização, reciclagem e recuperação para uso interno na própria indústria. Além disso, 98,2% dos resíduos gerados de classe II são destinados em unidades localizadas no próprio estado do Paraná.

A Figura 21 ilustra geograficamente o estado do Paraná de acordo com as regionais definidas pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

Uma vez que o limite e escopo do sistema abrangem as perspectivas geográfica e setorial, bem como pretende atender o nível de simbiose entre indústrias organizadas “virtualmente” em uma região mais ampla, a demonstração do modelo será realizada por meio de dados industriais dos setores de papel, plástico, metal, madeira e vidro. Para tanto, esta pesquisa definiu como ponto de partida da modelagem dos dados, o relatório da situação dos resíduos sólidos do PERS PR (PARANÁ, 2017). Este relatório construiu o diagnóstico dos RSI no Paraná por meio de um levantamento de dados com base em diversas fontes, pois não há uma fonte única sistematizada para esses resíduos.

Figura 21 – Mapa do estado do Paraná e regionais IAP.



Fonte: IAP (2019).

Devido aos dados do Estado não possuírem padronização e interoperabilidade, foi necessário atrelar o relatório PERS PR à classificação nacional de atividade econômica (CNAE) (IBGE, 2019) e às atividades industriais do inventário IAP de geração de resíduos (IAP, 2016). Desta forma, foi possível identificar a localização das indústrias com maior geração de resíduo por setor e assim coletar os dados na plataforma do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) do Estado (IAP, 2019). Apesar da inconsistência e parcialidade dos dados, diante da inexistência de informações mais detalhadas, foram considerados suficientes para fins de demonstração do modelo proposto por esta pesquisa.

Os dados industriais de cada município que constituem os escritórios regionais do IAP, foram coletados através das licenças ambientais em operação no SGA (IAP, 2019). Para cada empreendimento industrial foram extraídos os seguintes dados: atividade industrial, localização (regional e município), tipo de produto elaborado conforme as categorias de RSI, quantidade de produto elaborado, quantidade de matéria-prima utilizada, e quantidade de resíduo gerado.

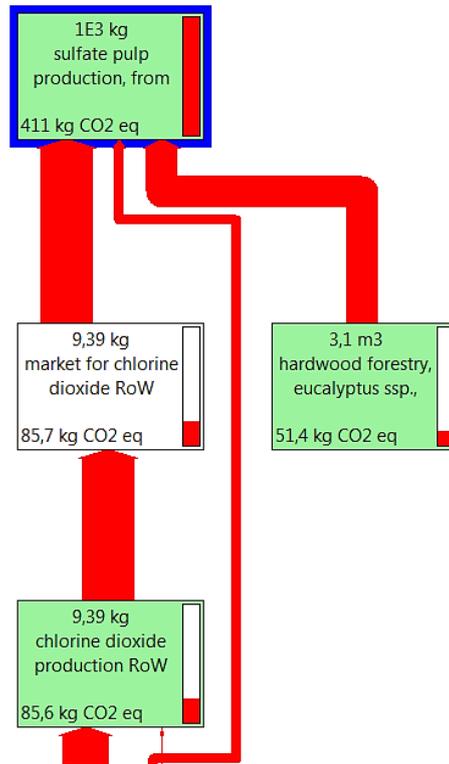
O estado do Paraná conta com 60 empreendimentos que são licenciados pelo IAP para recepção de RSI, sendo que destes, 26 são utilizados apenas para armazenamento temporário e transbordo. Para a reciclagem de materiais há 4 unidades licenciadas nos municípios de Irati,

Joaquim Távora, Paranavaí e São José dos Pinhais, e 4 aterros industriais de terceiros, que podem receber resíduos externos, localizados nos municípios de Curitiba, Guarapuava e Contenda (PARANÁ, 2017).

Diante destes dados, a cidade de Curitiba foi indicada como local da instalação da UVR, e para o aterro industrial, foi definida a localização de Guarapuava que possui duas unidades de recebimento de RSI. De acordo com o relatório PERS PR, a quantidade de RSI de classe II destinada para o “aterro industrial terceiros” é de 195.768,96 (ton./ano) e para “outras formas de reutilização/reciclagem/recuperação” e “sucateiros intermediários” é de 3.640.055,69 (ton./ano). O preço da disposição final de resíduos no aterro industrial para RSI de classe II é em média R\$175,00 por tonelada. Já o preço de compra dos resíduos é em média R\$305,00 por tonelada.

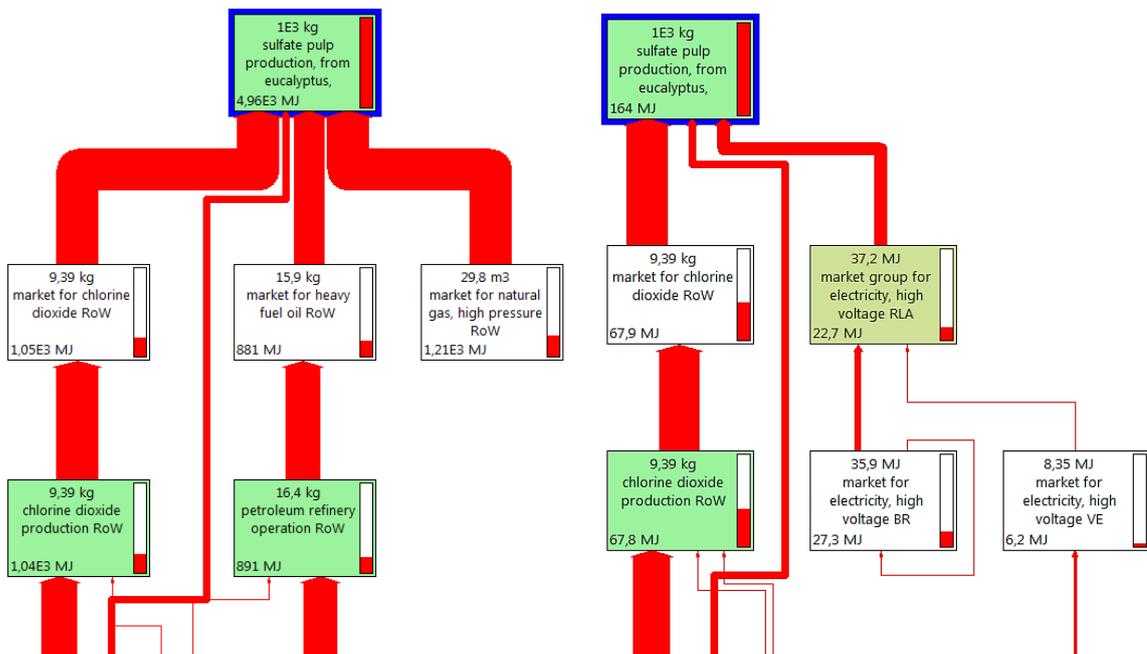
Para os dados de emissões de CO₂ e consumo de energia, foi utilizada a avaliação do ciclo de vida por meio da ferramenta SIMAPRO, com o apoio da base de dados *Ecoinvent 3, allocation, cut-off by classification – unit* e os métodos de cálculo específicos para as categorias de aquecimento global (IPCC 2013 GWP 100 anos) e consumo de energia (*Cumulative Energy Demand V1.11*). Em relação ao consumo de energia foram considerados: o consumo de energia fóssil e hídrica. O cálculo foi realizado considerando 1 tonelada de produto. Os processos avaliados foram selecionados de acordo com as unidades industriais apresentadas no modelo e com um escopo que limite ao *gate to gate* para evitar duplicação de informações. Além disso, a unidade de pré-tratamento de resíduos e o aterro industrial são representados pelo processo de triagem de papel, uma vez que não há outros processos de reciclagem cadastrados na base. As figuras 22 e 23 apresentam um exemplo de resultado obtido através da simulação no SIMAPRO.

Figura 22 – Emissão de CO₂ equivalente para a produção de celulose.



Fonte: A própria autoria.

Figura 23 – Consumo de energia (fóssil e hídrica) para a produção de celulose.



Fonte: A própria autoria.

O quadro 11 apresenta as informações consolidadas extraídas após as simulações no SIMAPRO para obtenção dos dados de emissão de CO₂ e energia de cada processo.

Quadro 11 – Emissão de CO₂ e consumo de energia.

Processo	Descrição	kg CO ₂ eq/ tonelada	MJ Energia/ tonelada	
			Fóssil	Hídrica
Produção de celulose	<i>Sulfate pulp, bleached{RLA} sulfate pulp production, from eucalyptus, bleached Cut-off, U</i>	411	4960	164
Produção de papel	<i>Solid bleached board {RoW} production Cut-off, U</i>	1330	16900	624
Produção de PE granulado	<i>Polyethylene, linear low density, granulate {RoW} production Cut-off, U</i>	1930	70400	267
Produção de plástico	<i>Packaging film, low density polyethylene {RoW} production Cut-off, U</i>	2900	80400	1470
Produção de madeira serrada	<i>Sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed {RoW} planing, beam, softwood, u=10% Cut-off, U</i>	162	2080	94,8
Produção de painéis de madeira	<i>Particle board, for indoor use {BR} particle board production, for indoor use, Cut-off, U</i>	696	12440	942
Produção de pellet de ferro	<i>Iron pellet {RoW} production Cut-off, U</i>	108	1480	51
Produção de ferro fundido	<i>Cast iron {RoW} production Cut-off, U</i>	1770	20700	486
Produção de areia	<i>Silica sand {RoW} production Cut-off, U</i>	36,7	393	4,9
Produção de vidro	<i>Flat glass, coated {RoW} production Cut-off, U</i>	1130	13200	246
Tratamento de resíduos	<i>Waste paperboard {RoW} treatment of, sorting plant Cut-off, U</i>	22,8	220	5,58
Aterro industrial	<i>Waste paperboard {GLO} treatment of waste paperboard, unsanitary landfill, dry infiltration class (100mm) Cut-off, U</i>	2830	68,5	0,245

Fonte: A própria autoria.

Para a utilização das indústrias foram usados os dados de produção na indústria paranaense apresentadas na última Pesquisa Conjuntural da Indústria, de dezembro do ano de 2018, publicado pela Federação Industrial do Estado do Paraná (FIEP PR, 2018) (TABELA 1). Ressalta-se que a capacidade de produção está associada a quantidade de produto elaborado (toneladas/dia) apresentado nas licenças ambientais para operação.

Tabela 1 - Utilização industrial do Paraná.

Atividades	%Utilização DEZ
Produtos de Madeira	63,33
Celulose, Papel e Produtos de papel	43,81
Produtos Químicos	75,29
Artigos de Borracha e Plástico	50,81
Produtos de Minerais Não-Metálicos	64,54
Metalúrgica	58,00
Produtos de Metal - Excl. Máquinas e Equipamentos	65,96
Máquinas e Equipamentos	60,93
Fabricação e Montagem de Veículos	83,02
Móveis e Indústrias Diversas	78,58

Fonte: FIEP (2018).

Os preços de produtos foram coletados em diferentes relatórios de indústrias representantes dos setores, como o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA-Esalq, USP), Braskem, Vale e Usiminas. Para os resíduos que podem reentrar nos processos, a partir da unidade de pré-tratamento, foram adotados os preços apresentados na pesquisa desenvolvida por Xavier (2013). Para os resíduos que entram no processo, a partir de outras indústrias, utilizou-se os dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2019) (QUADRO 12).

Em relação às frações de separação de resíduos, considerou-se que quando realizado na própria indústria há perdas em termos de separação e limpeza. Desta maneira, para a fração da indústria, adotou-se a proporção entre a geração de resíduos para cada categoria e a produção de produto final. Para as frações de resíduos do pré-tratamento, foram utilizados os dados apontados na pesquisa de Xavier (2013) (QUADRO 13).

Quadro 12 – Preços dos produtos.

Tipo de Produto	Produto	Preço (R\$/ton)
<i>Indústria de Beneficiamento e Manufatura</i>		
Papel	Celulose e Pasta Mecânica	2.374,33
	Papel e Cartão	4.113,17
Plástico	Resinas e Derivados	600,00
	Plásticos	1.550,00
Madeira	Madeira Beneficiada	2.371,80
	Móveis	4.010,00
Metal	Pellet de Ferro	451,88
	Peças Metálicas (Ferro Fundido)	1355,00
Vidro	Areia	252,80
	Vidro Plano	8993,20
<i>Unidade de Pré-Tratamento</i>		
Papel		440,00
Plástico		1100,00
Madeira		150,00
Metal		3000,00
Vidro		70,00
<i>Outra Indústria de Manufatura</i>		
Papel		470,00
Plástico		2000,00
Madeira		200,00
Metal		3500,00
Vidro		200,00

Fonte: A própria autoria.

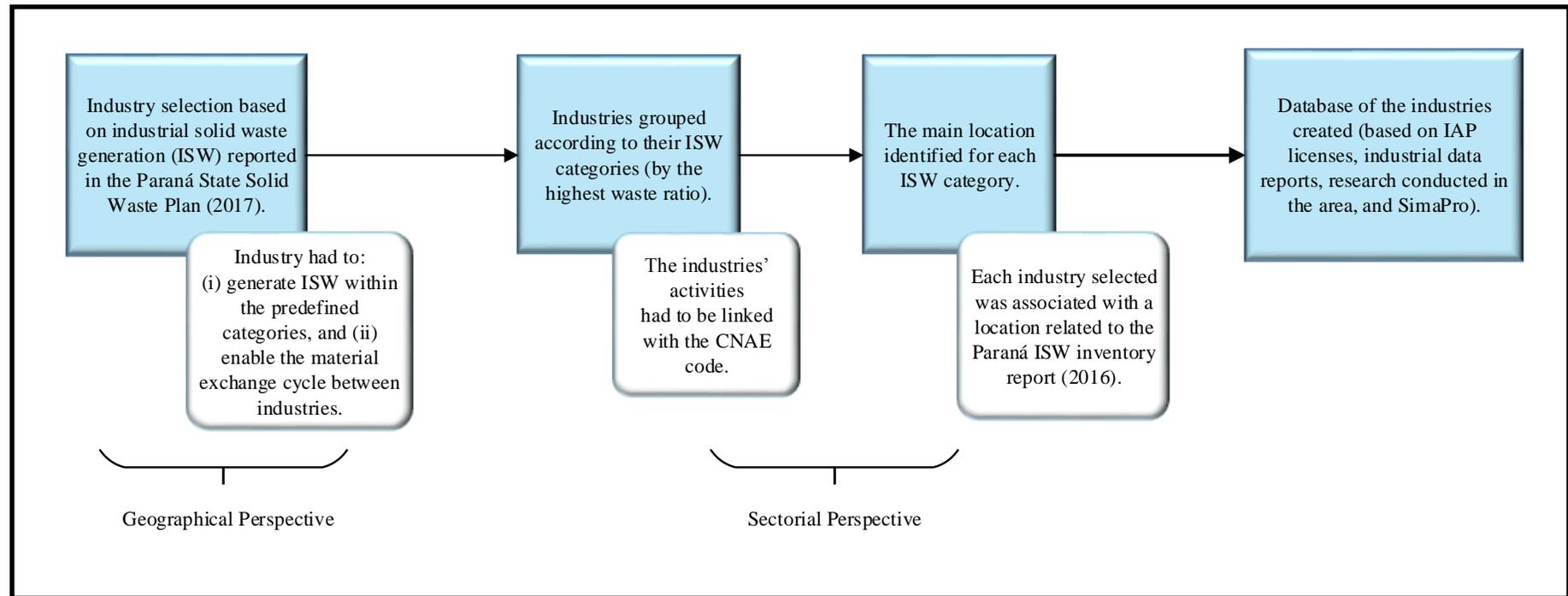
Quadro 13 – Taxa de reciclagem de produtos.

Tipo de Reciclável	Fração
Plástico	0,3710
Papel	0,3720
Metal	0,1140
Vidro	0,0194
Outros / Madeira	0,0019

Fonte: Xavier (2013).

De forma resumida, a construção da base de dados é apresentada na figura 24.

Figura 24 – Formulação da base de dados.



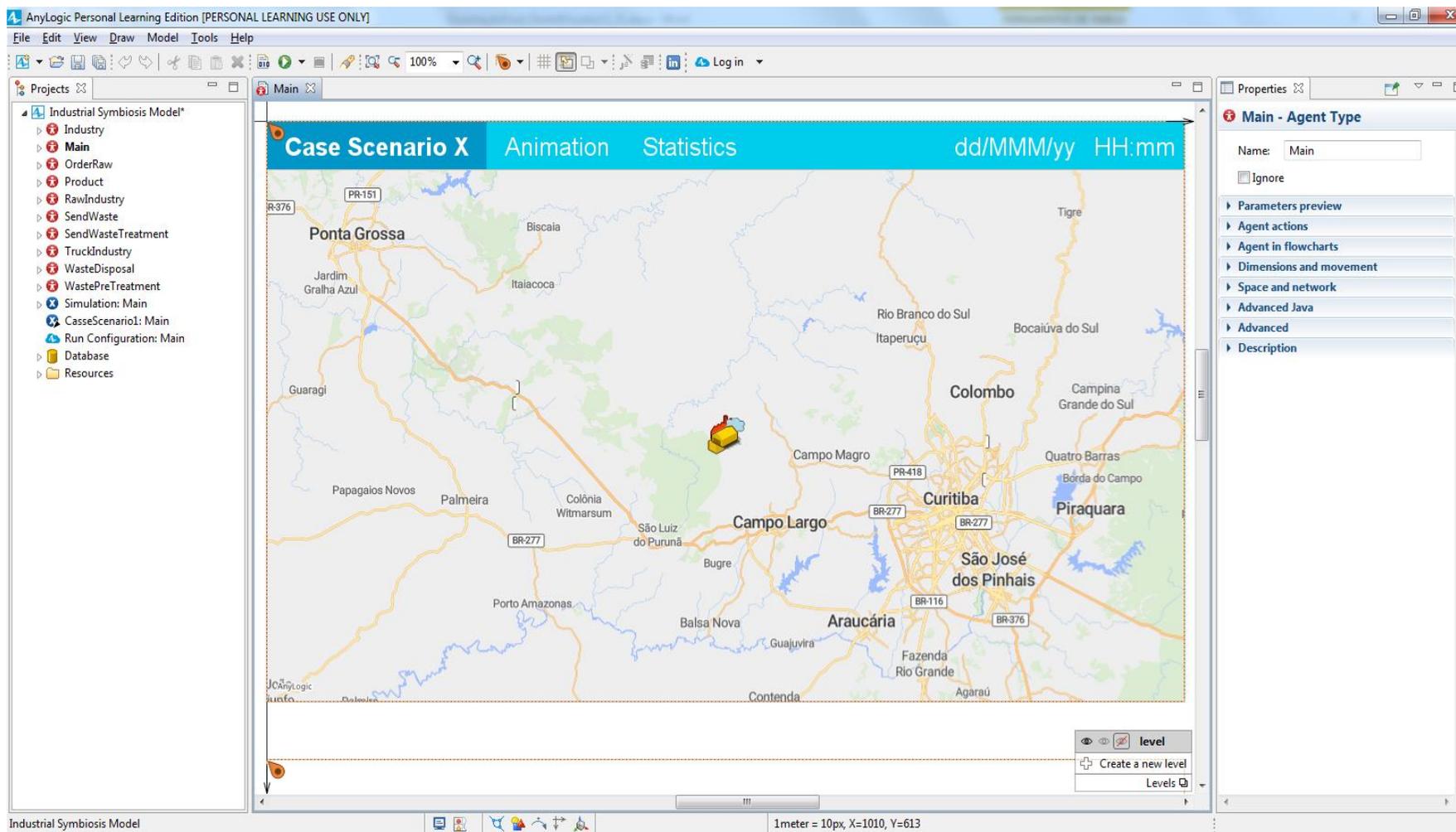
Fonte: A própria autoria.

Diante deste contexto, a demonstração da aplicação do modelo foi realizada através da implementação computacional, ou seja, a codificação em uma linguagem de simulação apropriada. Para esta etapa, foi utilizado o *software Anylogic* versão 8.5.0, licença de aprendizado. A linguagem de programação utilizada pela ferramenta é a orientada a objetos, denominada Java. A figura 25 apresenta a interface de construção do modelo dentro do *Anylogic* na qual é possível identificar todos os agentes que compõem o modelo.

Além disso, o modelo usa um mapa GIS (Sistema de Informações Geográficas) para definir as localizações das unidades industriais. Este sistema possui também a capacidade de recuperar a localização atual no mapa para um agente, mover o agente de um local para outro pelas rotas existentes, bem como executar ações na chegada e animar o agente (estático ou em movimento) em seu local.

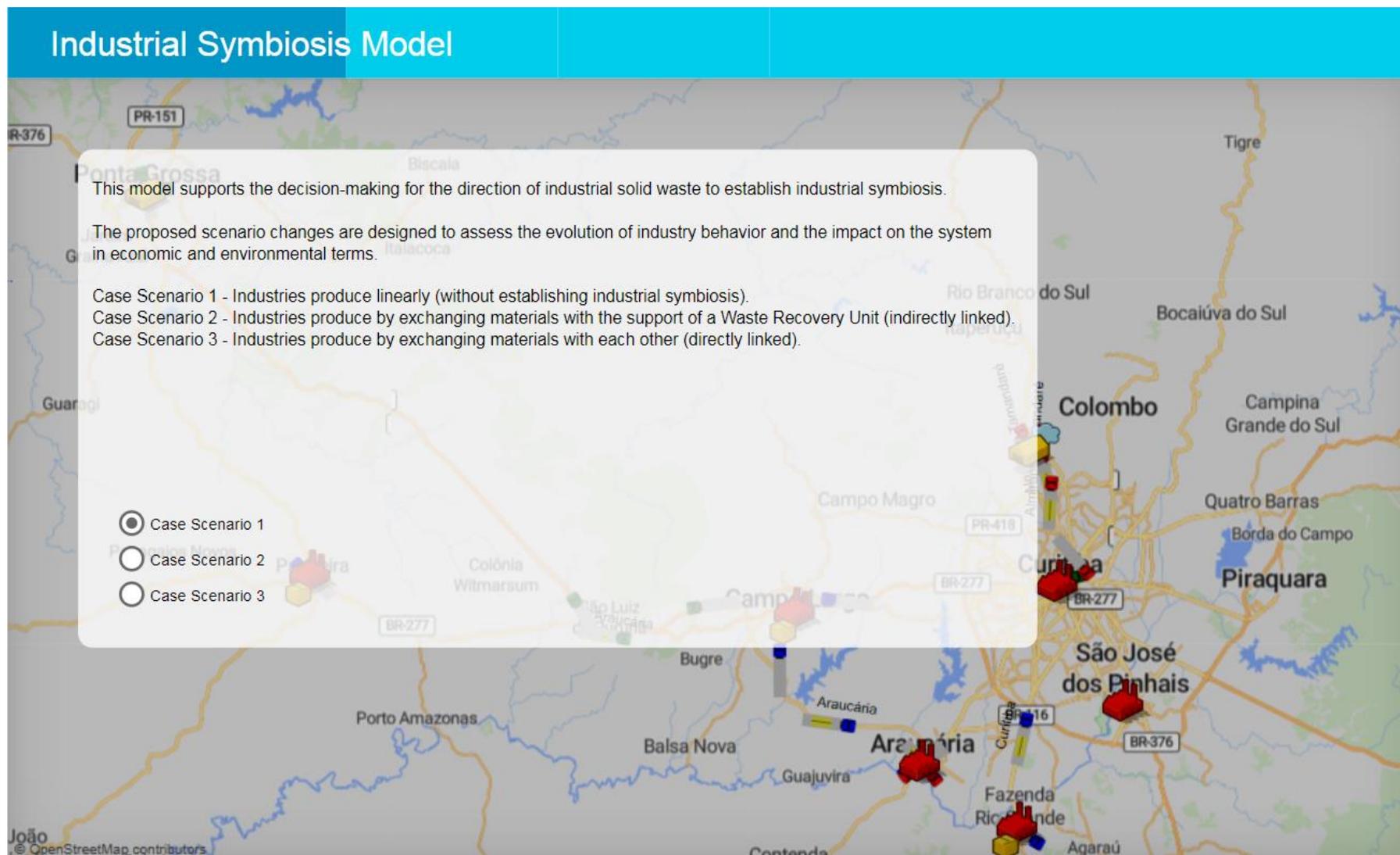
A figura 26 apresenta a tela inicial de abertura da simulação do modelo desenvolvido com a descrição, a definição do objetivo e os botões de opção de seleção dos cenários a serem simulados. As figuras 27, 28, 29, 30 apresentam as telas do modelo desenvolvido no *Anylogic* para cada agente industrial, indústria de manufatura, indústria de beneficiamento, unidade de pré-tratamento de resíduos e aterro industrial. Cada um destes agentes possui seus parâmetros, estado de operação, a dinâmica do sistema de produção com seus subprodutos e o fluxo de informação dos pedidos.

Figura 25 – Criação do modelo de simbiose no *Anylogic*.



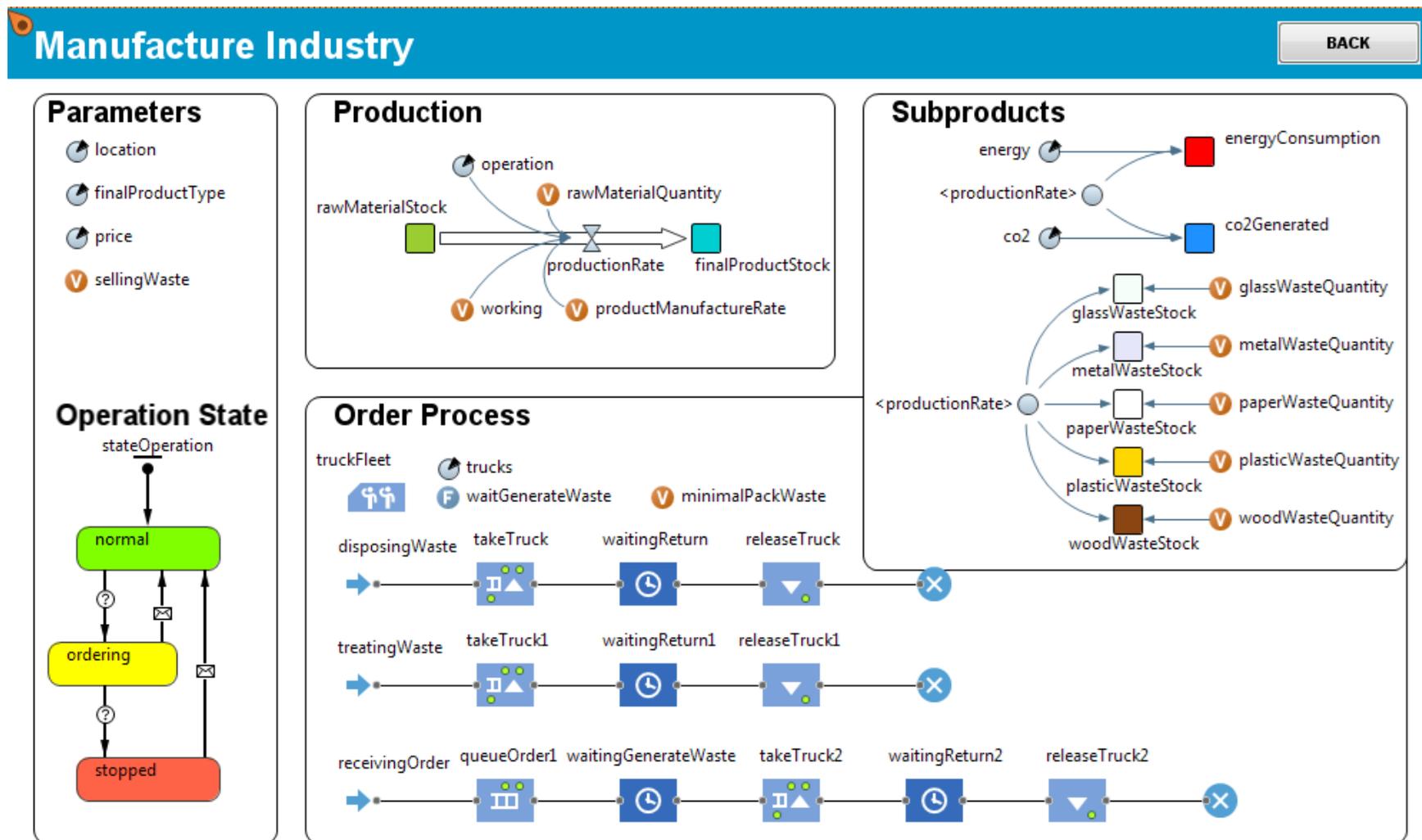
Fonte: A própria autoria.

Figura 26 – Tela inicial do modelo de simbiose industrial.



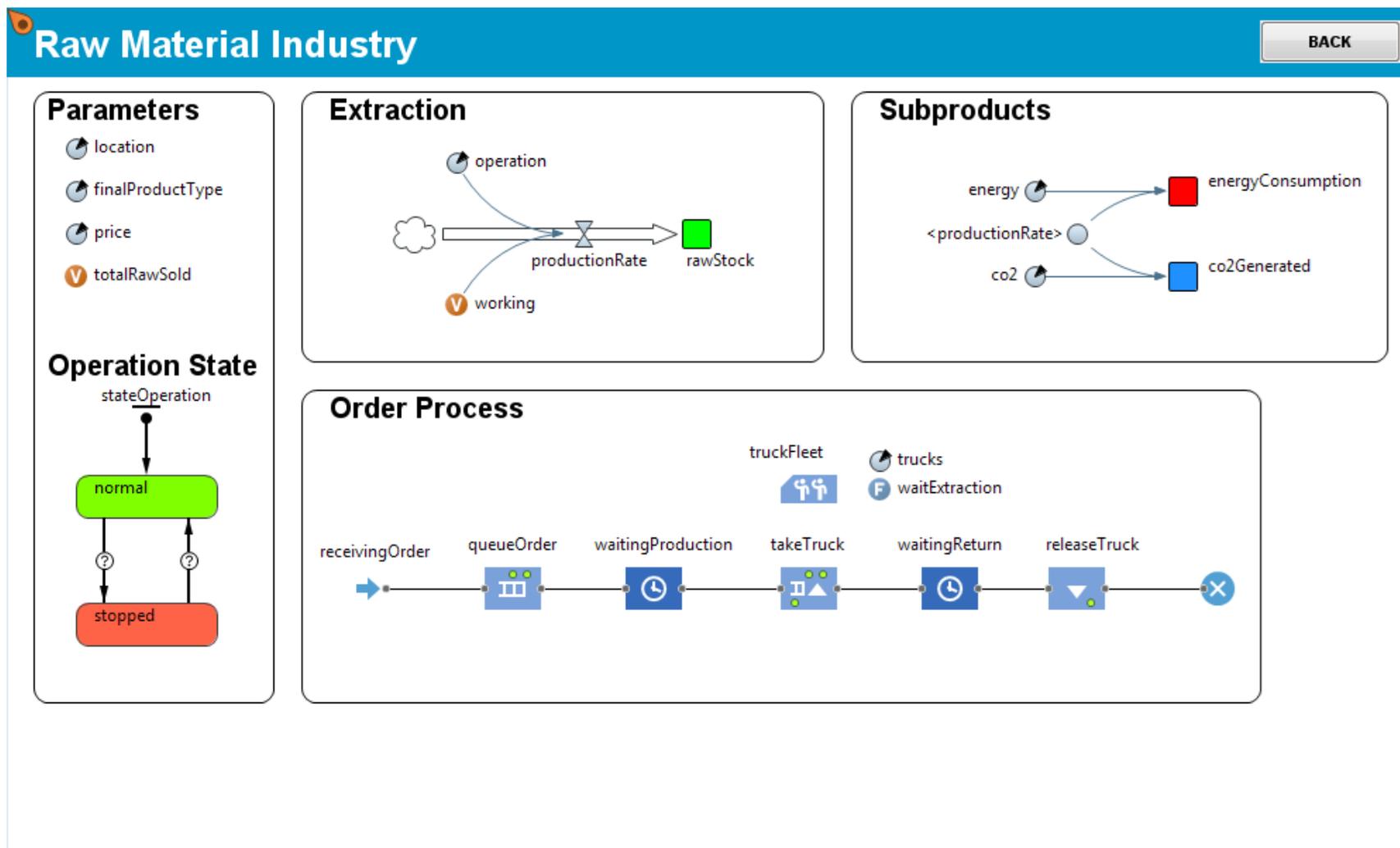
Fonte: A própria autoria.

Figura 27 – Agente da indústria de manufatura.



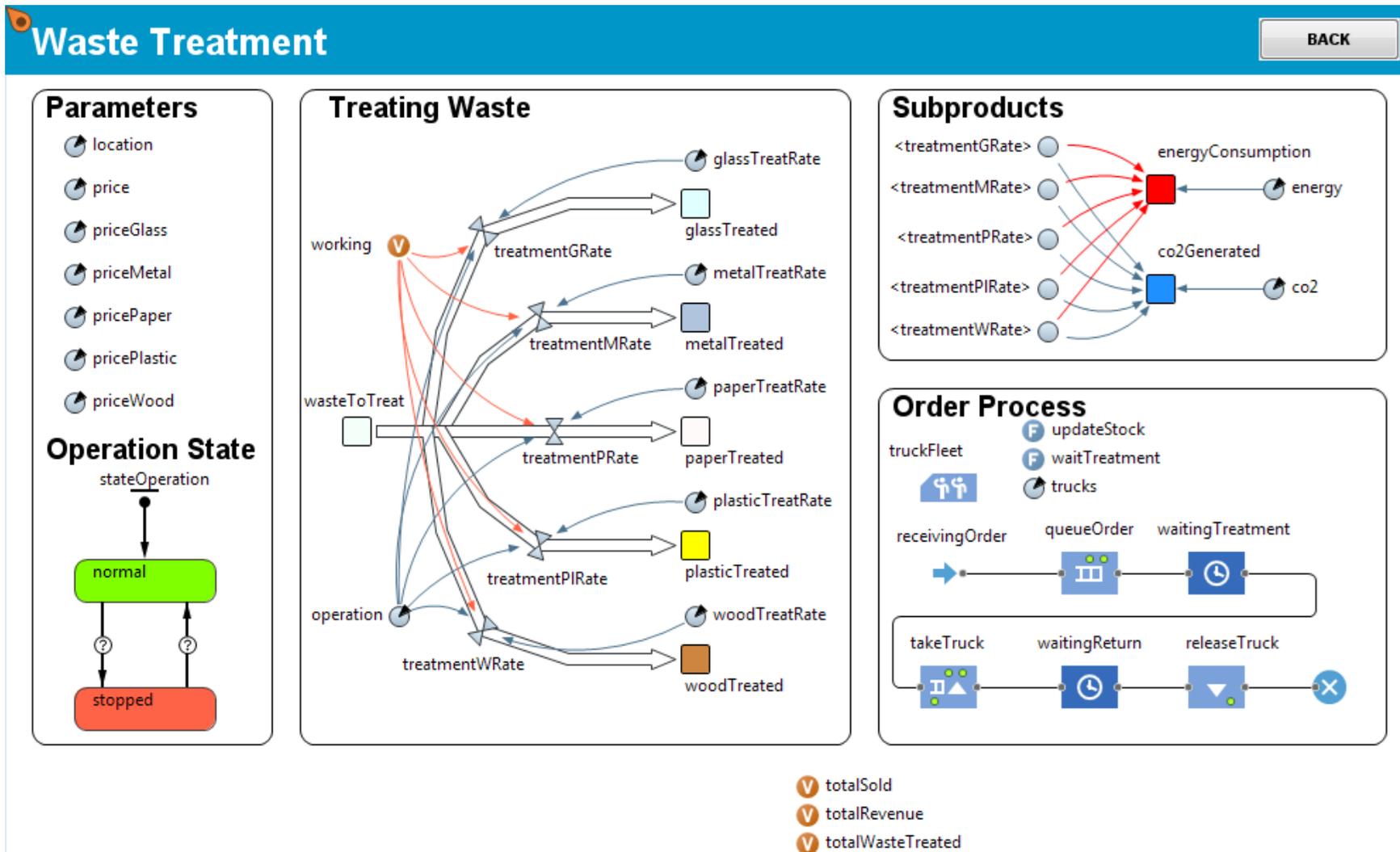
Fonte: A própria autoria.

Figura 28 – Agente da indústria de beneficiamento.



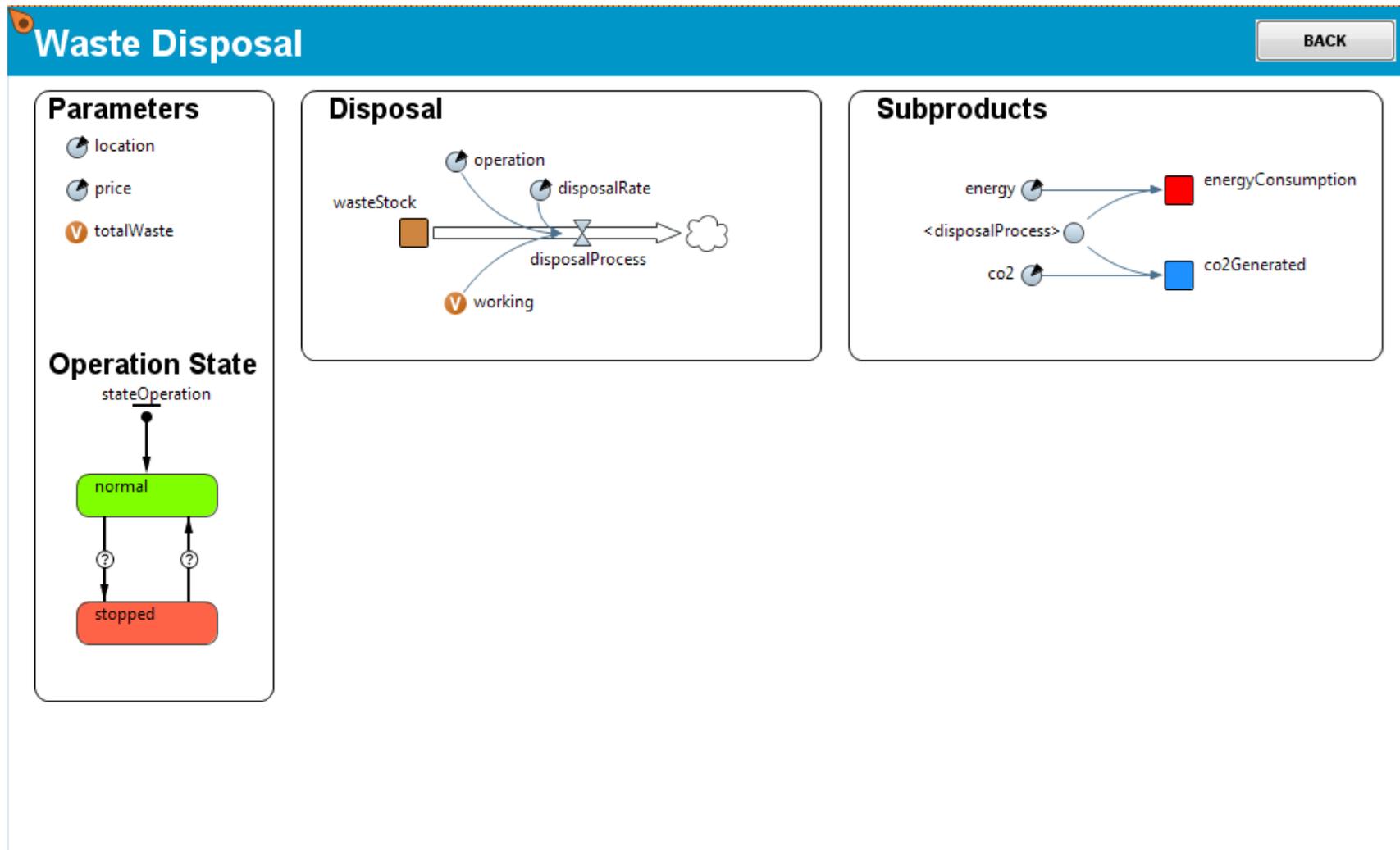
Fonte: A própria autoria.

Figura 29 – Agente da unidade de valorização de resíduos.



Fonte: A própria autoria.

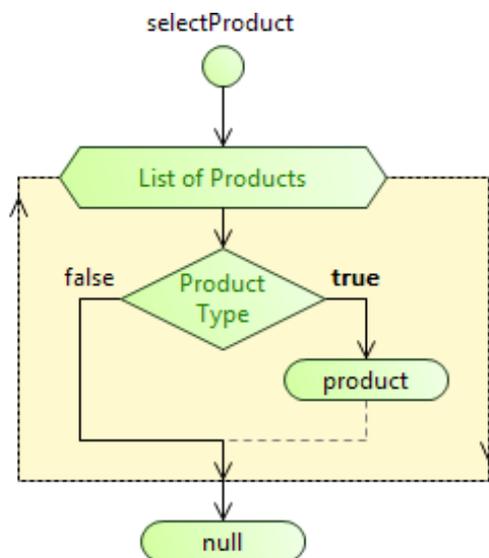
Figura 30 – Agente do aterro industrial.



Fonte: A própria autoria.

Inicialmente, as indústrias precisam ser alimentadas com as informações referentes aos agentes produtos (FIGURA 31).

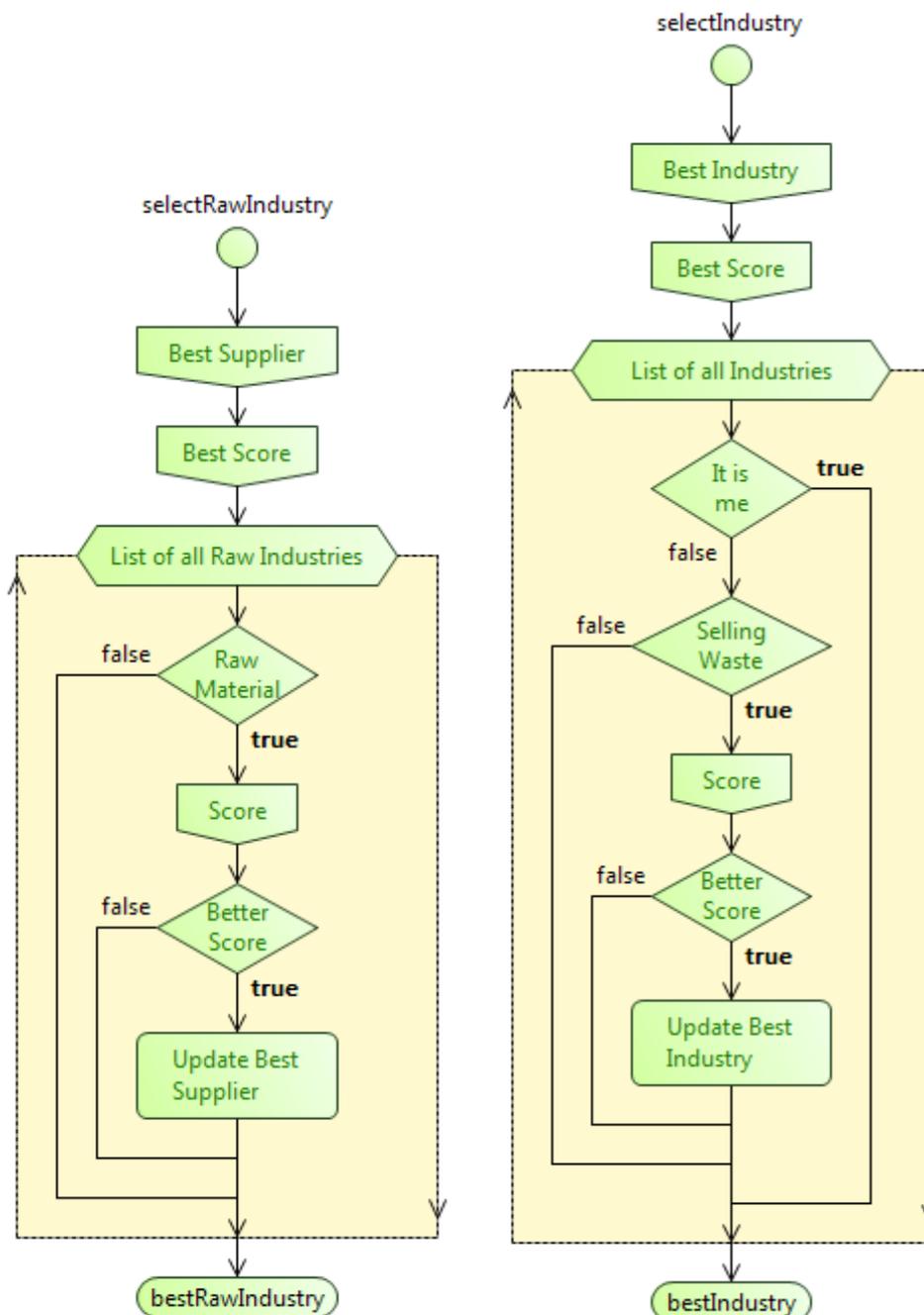
Figura 31 – Seleção dos produtos.



Fonte: A própria autoria.

Para selecionar qual a indústria de beneficiamento será utilizada para obter matéria-prima, o modelo segue o fluxo inicial denominado “selectRawIndustry”. E, para selecionar entre as indústrias de manufatura, aquelas que fornecerão resíduos como material de entrada para a produção, acompanha-se o fluxo “selectIndustry” (FIGURA 32).

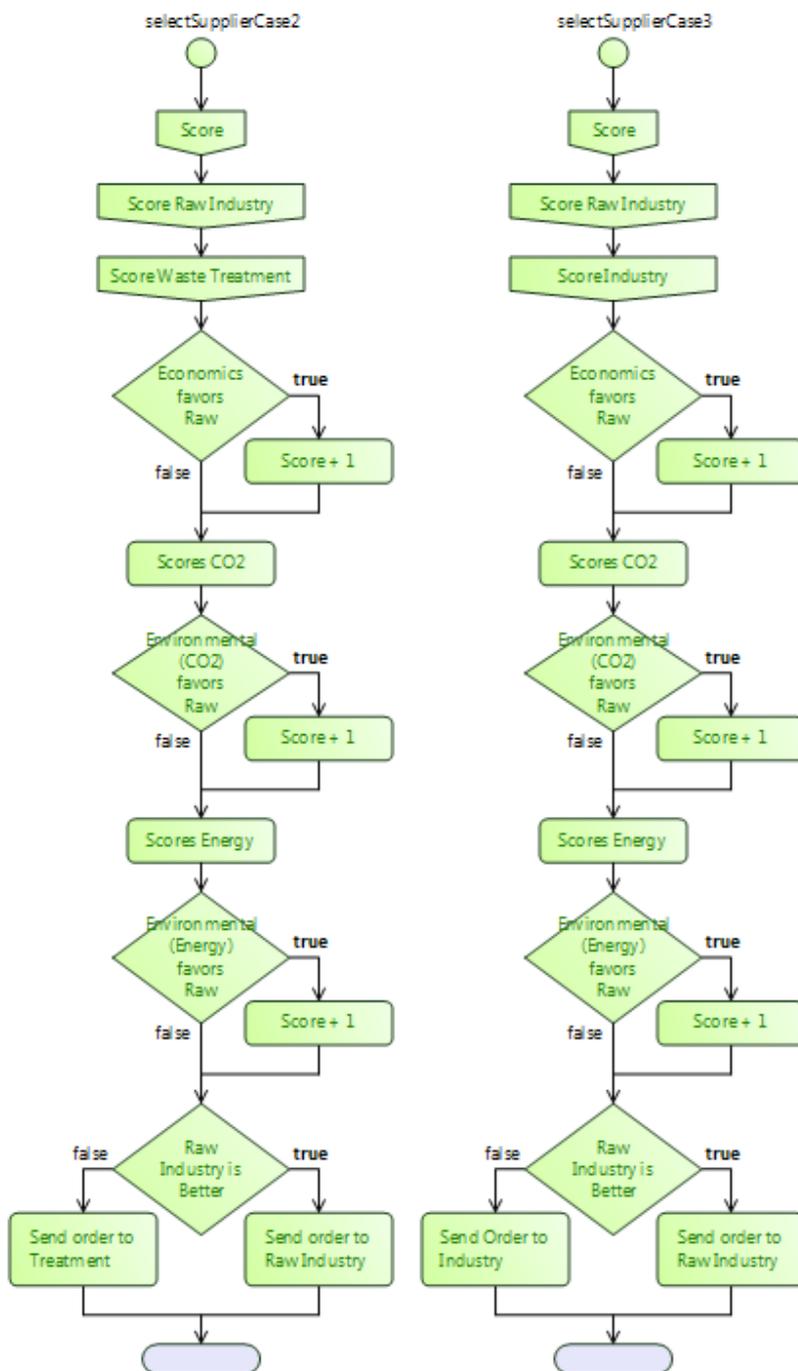
Figura 32 – Seleção das indústrias.



Fonte: A própria autoria.

Para selecionar qual o fornecedor será utilizado em cada cenário, o modelo segue os fluxos “selectSupplierCase2” e “selectSupplierCase3” (FIGURA 33).

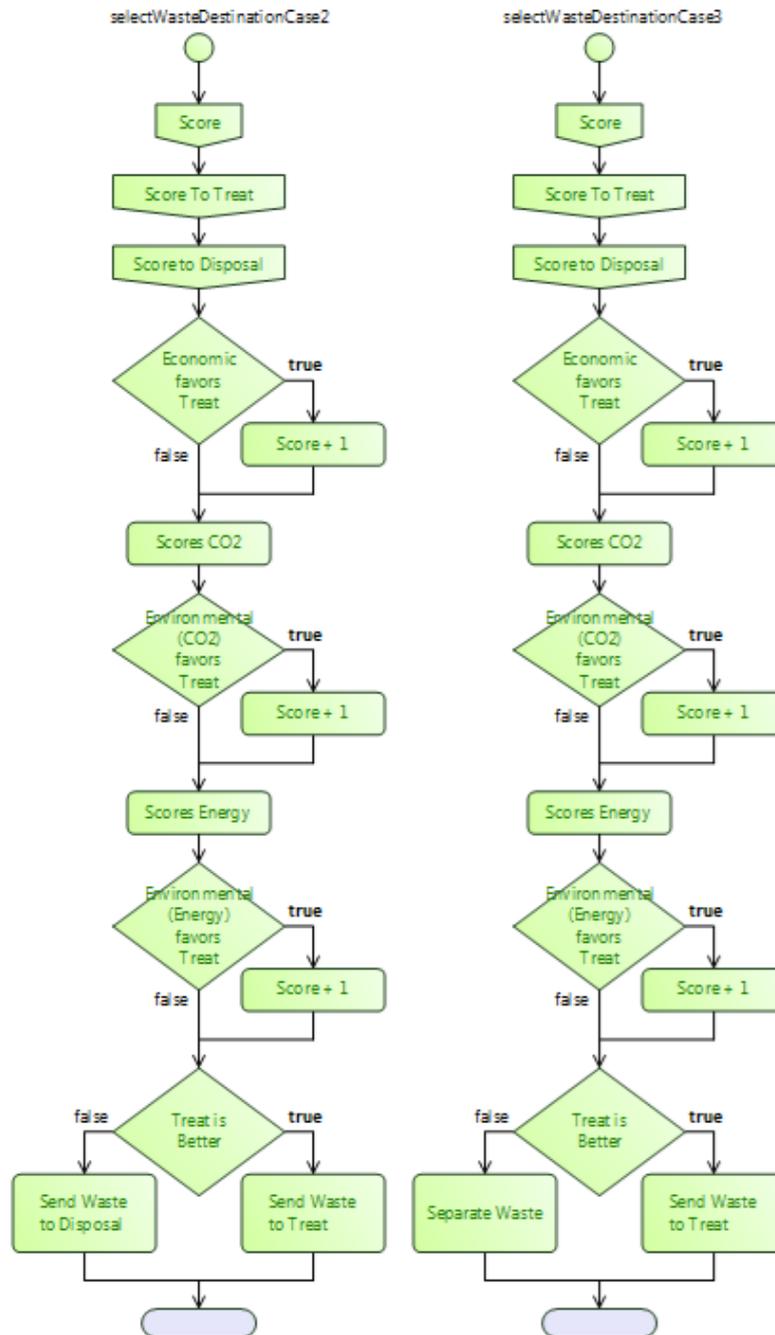
Figura 33 – Seleção do fornecedor.



Fonte: A própria autoria.

Para selecionar qual o destino de envio dos resíduos em cada cenário, o modelo segue os fluxos “selectWasteDestinationCase2” e “selectDestinationCase3” (FIGURA 34).

Figura 34 – Seleção do direcionamento de RSI.



Fonte: A própria autoria.

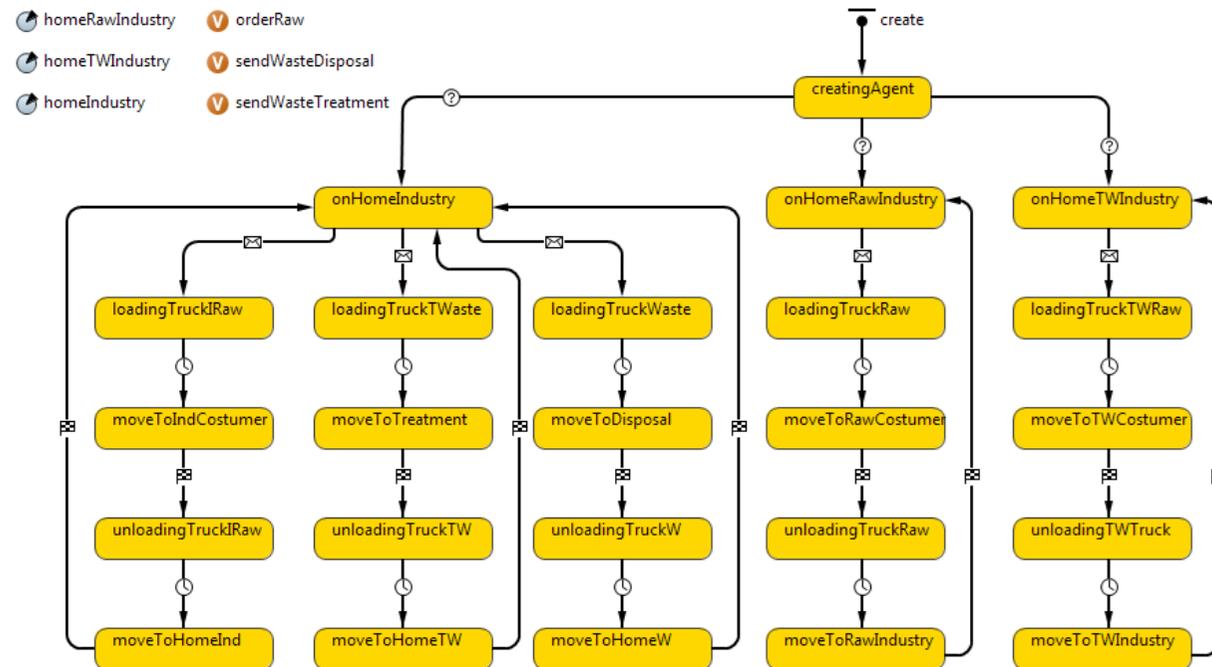
As funções utilizadas no modelo simulado, as variáveis e parâmetros são apresentadas na figura 35. Por fim os fluxos de movimentação dos agentes caminhões são apresentados na figura 36, através de estados, e seguem com base na localização inicial para movimentação: (i) na indústria de manufatura, (ii) na indústria de matéria-prima, ou (iii) na indústria de pré-tratamento.

Figura 35 – Funções, variáveis e parâmetros.



Fonte: A própria autoria.

Figura 36 – Movimentação dos caminhões.



Fonte: A própria autoria.

Para avaliar cada cenário foram extraídas informações referentes ao ciclo de materiais do sistema (matéria-prima, produto final e resíduos), e aos impactos ambientais e econômicos. Os indicadores do sistema, associados a estas informações, possuem os componentes apresentados no quadro 14.

Quadro 14 – Componentes de indicadores do sistema.

Componentes	Descrição
qPF_i	quantidade de produto final i produzido na indústria de manufatura
qMP_i	quantidade de matéria – prima i produzida na indústria de beneficiamento
qRP_i	quantidade de resíduo i proveniente de outra indústria de manufatura
qRE_i	quantidade de resíduo i enviado para outra indústria de manufatura
$qRpT_i$	quantidade de resíduo i enviado para tratar na unidade de valorização
qRT_i	quantidade de resíduo i proveniente do tratamento na unidade de valorização
qRA_i	quantidade de resíduo i enviado para aterro industrial
pPF_i	preço do produto final i
pMP_i	preço da matéria – prima i
pR_i	preço de venda do resíduo i
pRT_i	preço de venda do resíduo i tratado na unidade de valorização
pRA_i	preço de envio do resíduo i para aterro industrial
CO_{2i}	emissão de CO_2 pela indústria de manufatura i
CO_{2j}	emissão de CO_2 pela indústria de beneficiamento j
CO_{2k}	emissão de CO_2 pela unidade de valorização de resíduos k
CO_{2l}	emissão de CO_2 pelo aterro industrial l
$Energia_i$	energia consumida pela indústria de manufatura i
$Energia_j$	energia consumida pela indústria de beneficiamento j
$Energia_k$	energia consumida pela unidade de valorização de resíduos k
$Energia_l$	energia consumida pelo aterro industrial l
n	número de agentes industriais

Fonte: A própria autoria.

Para condensar as informações de cada um dos cenários criados, os indicadores utilizados seguem as equações apresentadas em 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

$$\text{Total de matéria prima virgem utilizada no sistema} = \sum_{i=1}^n qMP_i \quad (16)$$

$$\text{Total de produto final manufacturado pelas indústrias} = \sum_{i=1}^n qPF_i \quad (17)$$

$$\text{Total de resíduos enviados para aterro industrial} = \sum_{i=1}^n qRA_i \quad (18)$$

$$\text{Impacto ambiental de } CO_2 = \sum_{i=1}^n CO_{2i} + \sum_{j=1}^n CO_{2j} + \sum_{k=1}^n CO_{2k} + \sum_{l=1}^n CO_{2l} \quad (19)$$

$$\text{Impacto ambiental de Energia} = \sum_{i=1}^n Energia_i + \sum_{j=1}^n Energia_j \quad (20)$$

$$+ \sum_{k=1}^n Energia_k + \sum_{l=1}^n Energia_l$$

$$\text{Lucro do sistema} = \sum_{i=1}^n (qPF_i * pPF_i) - \sum_{i=1}^n (qMP_i * pMP_i) - \sum_{i=1}^n (qRP_i \quad (21)$$

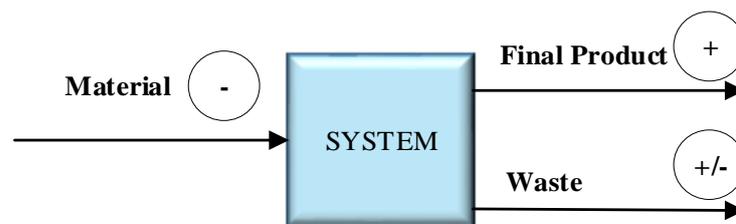
$$* pR_i) - \sum_{i=1}^n (qRT_i * pRT_i) - \sum_{i=1}^n (qRA_i * pRA_i) + \sum_{i=1}^n (qRpT_i$$

$$* pR_i) + \sum_{i=1}^n (qRE_i * pR_i)$$

A definição de lucro do sistema adotada por esta pesquisa refere-se ao lucro bruto e, portanto, expressa a diferença entre as receitas obtidas e os custos. As receitas estão associadas aos produtos finais e aos resíduos (quando direcionados para pré-tratamento na unidade de valorização ou para outra indústria), e os custos estão associados ao material de entrada e aos resíduos (quando direcionados para o aterro industrial). O lucro constitui um importante referencial para orientar decisões econômicas de agentes (FUJI, 2004).

De maneira geral, a composição do lucro do sistema é representada pela figura 37.

Figura 37 – Lucro do sistema.



Fonte: A própria autoria.

Após a implementação computacional, o modelo foi então alimentado com os dados de entrada e os cenários foram simulados ao longo do tempo. Com o intuito de consolidar as informações de cada cenário e apoiar a tomada de decisão foram criados gráficos de barras dentro do próprio ambiente da ferramenta *Anylogic*. As figuras 38, 39, 40, 41, 42 e 43 são exemplos dos resultados apresentados nos cenários em 5 anos de operação. Os gráficos demonstram a energia consumida e as emissões de CO_2 de cada agente industrial do sistema modelado, e as quantidades de RSI, material de entrada e produto final produzido, bem como o lucro obtido em cada sistema. A simulação representa a dinâmica de operação dos sistemas e permite a visualização dos resultados dos cenários.

Figura 38 – Simulação Cenário 1 para 5 anos.



Fonte: A própria autoria.

Figura 39 – Simulação Cenário 1 para 5 anos.



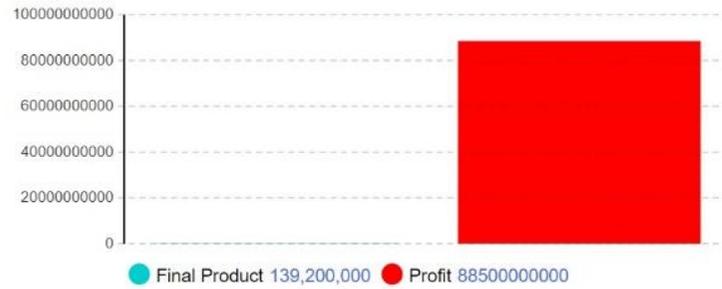
Fonte: A própria autoria.

Figura 40 – Simulação Cenário 2 para 5 anos.



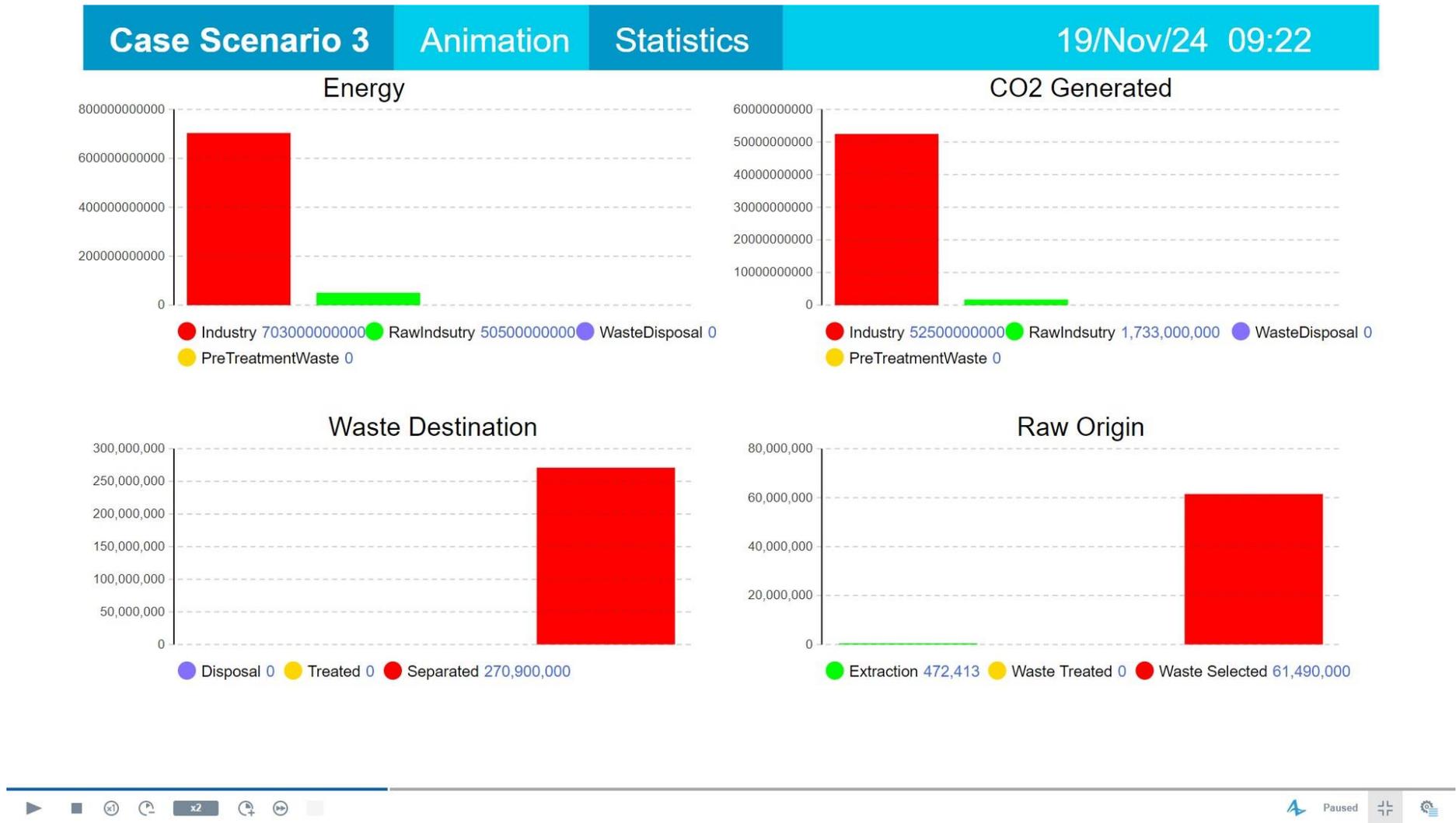
Fonte: A própria autoria.

Figura 41 – Simulação Cenário 2 para 5 anos.



Fonte: A própria autoria.

Figura 42 – Simulação Cenário 3 para 5 anos.



Fonte: A própria autoria.

Figura 43 – Simulação Cenário 3 para 5 anos.



Fonte: A própria autoria.

O quadro 15 apresenta os dados de saídas dos cenários para o fim do período de 5 anos, considerado como período de cenário base. A simulação evidencia que, no sistema da rede de produção linear (cenário 1), todo o material de entrada é consumido pela indústria de beneficiamento e todos os resíduos são enviados para aterro industrial. Neste cenário 1, o consumo de energia e as emissões de CO₂ aumentam devido à intensa atividade de produção nas indústrias de beneficiamento e ao envio de resíduos ao aterro industrial. Percebe-se também que a produção de produtos finais é menor quando comparado aos cenários 2 e 3. Neste sentido, o lucro do sistema é menor do que os cenários 2 e 3.

Quadro 15 – Dados de saída da simulação para 5 anos.

Resultados	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	<u>Consumo de Energia (MJ)</u>		
Indústria de Manufatura	234.000.000.000	2.240.000.000.000	703.000.000.000
Indústria de Beneficiamento	91.900.000.000	34.700.000.000	50.500.000.000
Aterro Industrial	879.900.000	0	0
UVR	0	598.000.000.000	0
	<u>Emissão de CO₂ (kg)</u>		
Indústria de Manufatura	16.900.000.000	174.000.000.000	52.500.000.000
Indústria de Beneficiamento	3.598.000.000	1.274.000.000	1.733.000.000
Aterro Industrial	36.200.000.000	0	0
UVR	0	60.500.000.000	0
	<u>RSI final (toneladas)</u>		
Enviado para o aterro industrial	12.800.000	0	0
Enviado para UVR	0	2.652.000.000	0
Enviado para outra indústria de manufatura	0	1.070.000.000	270.900.000
	<u>Material de entrada (toneladas)</u>		
Da indústria de beneficiamento	13.710.000	0	472.413
Da UVR	0	140.000.000	0
De outra indústria de manufatura	0	0	61.490.000
<u>Produto final produzido (toneladas)</u>	12.930.000	139.200.000	41.220.000
<u>Lucro do Sistema (R\$)</u>	47.600.000.000	88.500.000.000	265.000.000.000

Fonte: A própria autoria.

Em contrapartida no sistema de rede industrial com conexão indireta (cenário 2), o material de entrada é originário da UVR e os RSI são direcionados para a UVR ou para outra indústria. Corroborando assim para que o consumo de energia e emissão de CO₂ aumentem na UVR e nas indústrias de manufatura. No cenário 2, a operação das indústrias de beneficiamento, as quais fornecem matéria-prima virgem, é menor. Neste cenário o montante de produtos finais produzidos é em torno de 10 vezes maior do que aquele produzido no cenário 1. E o lucro obtido no sistema é o dobro.

No sistema de rede industrial com conexão direta (cenário 3), o material de entrada é proveniente tanto da indústria de beneficiamento quanto de outras indústrias de manufatura, fechando o ciclo de materiais de entrada entre indústrias. Neste cenário os RSI são diretamente enviados para outras indústrias de manufatura. O consumo de energia e emissão de CO₂ do sistema é menor quando comparado ao cenário 2, e maior em relação ao cenário 1. É importante ressaltar que neste cenário o montante de produtos finais produzidos é 4 vezes maior que do cenário 1. Em termos de impacto econômico, o lucro obtido neste sistema é o maior de todos os cenários, representando um ganho de até 6 vezes mais do que em relação aos demais cenários. Apesar do montante de produtos finais ser menor que aquele produzido no cenário 2, o lucro do sistema é maior, pois este resultado é reflexo da decisão de utilizar o material de entrada proveniente das unidades industriais, e de direcionar os resíduos para consumo em outras indústrias.

Os dados de saída das simulações em cada um dos cenários ao longo dos horizontes de tempo de 10 e 20 anos, podem ser visualizados nos quadros 16 e 17. Nestes períodos, os cenários seguem a mesma dinâmica de evolução e são uma extensão da simulação de 5 anos (cenário base).

Quadro 16 – Dados de saída da simulação para 10 anos.

Resultados	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	<u>Consumo de Energia (MJ)</u>		
Indústria de Manufatura	468.000.000.000	5.850.000.000.000	2.290.000.000.000
Indústria de Beneficiamento	183.800.000.000	69.400.000.000	101.000.000.000
Aterro Industrial	1.759.800.000	0	0
UVR	0	1.560.000.000.000	0
	<u>Emissão de CO2 (kg)</u>		
Indústria de Manufatura	33.800.000.000	455.000.000.000	171.000.000.000
Indústria de Beneficiamento	7.196.000.000	2.548.000.000	3.466.000.000
Aterro Industrial	72.400.000.000	0	0
UVR	0	158.000.000.000	0
	<u>RSI final (toneladas)</u>		
Enviado para o aterro industrial	256.000.000	0	0
Enviado para UVR	0	6.932.000.000	0
Enviado para outra indústria de manufatura	0	279.7000.000	879.300.000
	<u>Material de entrada (toneladas)</u>		
Da indústria de beneficiamento	27.420.000	0	944.826
Da UVR	0	364.600.000	0
De outra indústria de manufatura	0	0	479.900.000
<u>Produto final produzido (toneladas)</u>	25.860.000	363.800.000	134.200.000
<u>Lucro do Sistema (R\$)</u>	95.200.000.000	230.000.000.000	859.000.000.000

Fonte: A própria autoria.

Quadro 17 – Dados de saída da simulação para 20 anos.

Resultados	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<u>Consumo de Energia (MJ)</u>			
Indústria de Manufatura	2.320.000.000.000	20.600.000.000.000	3.270.000.000.000
Indústria de Beneficiamento	478.000.000.000	180.485.300.000	262.665.000.000
Aterro Industrial	8.586.000.000	0	0
UVR	0	5.560.000.000.000	0
<i>Consumo de energia por unidade produzida</i>	<i>21.481</i>	<i>20.498</i>	<i>18.467</i>
<u>Emissão de CO2 (kg)</u>			
Indústria de Manufatura	167.000.000.000	1.610.000.000.000	244.000.000.000
Indústria de Beneficiamento	21.900.000.000	7.754.474.000	10.548.276.000
Aterro Industrial	354.000.000.000	0	0
UVR	0	562.000.000.000	0
<i>Emissão de CO2 por unidade produzida</i>	<i>4.225</i>	<i>1.696</i>	<i>1.331</i>
<u>RSI final (toneladas)</u>			
Enviado para o aterro industrial	124.900.000	0	0
Enviado para UVR	0	24.600.000.000	0
Enviado para outra indústria de manufatura	0	9.900.000.000	1.254.000.000
<u>Material de entrada (toneladas)</u>			
Da indústria de beneficiamento	129.200.000	0	4.451.900
Da UVR	0	1.286.000.000	0
De outra indústria de manufatura	0	0	1.110.000.000
<u>Produto final produzido</u>	128.500.000	1.285.000.000	191.300.000
<u>Lucro do Sistema (R\$)</u>	483.000.000.000	786.000.000.000	1.220.000.000.000
<i>Impacto econômico por unidade produzida</i>	<i>3.758,75</i>	<i>611,67</i>	<i>6.377,42</i>

Fonte: A própria autoria.

Como apontado, ao longo dos anos os cenários seguem a mesma dinâmica de evolução. Em relação aos impactos ambientais, é possível verificar, quando analisamos o resultado final de consumo de energia e emissões de CO₂ por produto final produzido no sistema, que o cenário

3 é mais favorável, seguido dos cenários 2 e 1. Em termos de impacto econômico do sistema, ocorre a mesma situação.

Diante do exposto, as hipóteses geradas inicialmente no desenvolvimento do modelo de simulação foram verificadas. Pode-se concluir que as indústrias produzindo isoladamente apresentam alto benefício econômico, porém o impacto ambiental é maior. À medida em que conexões são estabelecidas para realizar trocas de resíduos, o benefício econômico pode aumentar ou se manter, em contrapartida o impacto ambiental diminui. A entrada no sistema de uma UVR apoia o ciclo de materiais e diminui o impacto ambiental, contudo o benefício econômico fica comprometido, uma vez que o custo de materiais tratados é maior e depende diretamente da localização geográfica desta unidade.

A modelagem híbrida para ambientes de simbiose industrial é recente na literatura. A maioria dos modelos propostos adotam a ABM ou a DS como forma individual de abordagem para a problemática (BICHRAOUI; GUILLAUME; HALOG, 2013; CAO; FENG; WAN, 2009; GHALI; FRAYRET; AHABCHANE, 2017; MANTESE; AMARAL, 2017, 2018; ROMERO; RUIZ, 2013, 2014). Na literatura foi identificada uma única alternativa para modelagem híbrida de simbiose industrial proposta por Demartini, Tonelli e Bertani (2018, 2019). Contudo o modelo apresentado é simplificado e não aborda os impactos ambientais de energia e emissão de CO₂. Além disso, o enfoque está nos custos atrelados à cadeia de produção, e não tem como perspectiva o fluxo de materiais do sistema.

O modelo proposto por esta pesquisa é uma abordagem prática e genérica o suficiente para ser adaptado ao contexto necessário. Este modelo representa o comportamento dinâmico do sistema, e as possibilidades de cenários criadas, orientam os tomadores de decisão quanto aos objetivos de conexões simbióticas. A modelagem híbrida apoia na construção da complexidade. Se por um lado, os agentes por meio de seus atributos e comportamentos permitem que as ligações entre indústrias sejam estabelecidas, bem como viabilizam as alterações de cenários. Por outro, a dinâmica de sistemas representa o dinamismo da produção e possibilita a visualização dos fluxos de materiais gerados no sistema.

4.5 AVALIAÇÃO

A escolha do método de avaliação de pesquisa deve considerar o artefato e a sua aplicabilidade. Uma avaliação rigorosa do artefato e dos resultados obtidos na pesquisa contribui para a robustez do trabalho, e asseguram a confiabilidade de seus resultados. O rigor não pressupõe o uso de métodos sofisticados. O rigor implica em cuidados para evitar que algo

seja afirmado ou concluído sem que a pesquisa tenha condições de embasar. Na DSR trata-se de evidenciar e justificar os procedimentos adotados para aumentar a confiabilidade do artefato e de seus resultados, no que se refere a sua forma de aplicação (DRESCH, LACERDA, ANTUNES JÚNIOR, 2015, p. 100). O critério para validação do artefato se fundamenta na filosofia pragmática (WORREN; MOORE; ELLIOTT, 2002).

Esta pesquisa considerou dois eixos principais de avaliação: a avaliação do modelo conceitual e a avaliação do modelo de simulação. Considera-se o modelo conceitual validado pelo seu desenvolvimento ter sido atrelado em cada uma das etapas ao embasamento científico cabível. Além disso, durante a etapa de modelagem dos dados de entrada foi possível verificar que a modelagem atendia aos dados existentes para o contexto real.

Para a avaliação do artefato e verificação de sua aderência às necessidades do sistema foram adotados os métodos descritos por Hevner, March e Park (2004) como: (i) experimental, através da simulação do modelo para verificar e demonstrar o comportamento do artefato; e (ii) descritivo, por meio de um argumento composto por informações de bases de conhecimento relevantes para construir um argumento convincente, e da construção de cenários detalhados em torno do artefato para demonstrar a utilidade.

Para alimentar a entrada da simulação e a construção dos cenários, foi construída uma base de dados reais para o contexto do Estado do Paraná, coletados e consolidados junto aos relatórios e plataformas de organizações do Estado, e desta maneira considera-se robusta e consistente para a representação do modelo desenvolvido.

A etapa de avaliação do modelo ligada ao desenvolvimento computacional livre de *bugs* e falhas de lógica, foi realizada, segundo recomendação de Chwif e Medina (2010), por implementação modular. Ou seja, o modelo foi implementado em blocos, executando-se a verificação em cada bloco. Além disso, o próprio *Anylogic* possui um *debugger* interno que ajuda na eliminação de falhas de lógica na programação. Assim, após o fim da modelagem, constatou-se a inexistência de erros no código, o que corrobora para a consistência da simulação.

De acordo com a DSR a avaliação é a etapa em que o artefato é mensurado quanto ao suporte para solucionar o problema. Conceitualmente, tal avaliação poderia incluir qualquer evidência empírica apropriada ou prova lógica. Neste sentido, o resultado obtido com o modelo, conforme identificado na seção anterior, valida que o artefato atende aos objetivos iniciais desta pesquisa quanto ao apoio na tomada de decisão para estabelecer redes de simbiose industrial e direcionar RSI.

O presente capítulo expôs o desenvolvimento da pesquisa de acordo com as etapas descritas pelo *framework* da DSR. As etapas iniciais de identificação da problemática e definição dos objetivos da solução já haviam sido previamente desenvolvidas e publicada em artigo científico por esta autora (GUEDES; PAGANIN; BORSATO, 2018). Na sequência, as etapas de Projeto e Desenvolvimento, Demonstração e Avaliação do artefato modelo foram então detalhadas neste capítulo.

5 CONCLUSÃO

A necessidade de abordagem da gestão de resíduos sólidos industriais e a falta de ferramentas de apoio a esta gestão foi identificada na presente pesquisa. Com o intuito de embasar a tomada de decisão quanto ao direcionamento de RSI para estabelecer relações simbióticas, considerou-se nesta pesquisa que a estrutura que possibilita a solução da problemática apontada é um modelo híbrido com agentes industriais e dinâmica de sistemas de produção.

Para o desenvolvimento do modelo foi utilizado o *framework* da *Design Science Research*. As etapas constituintes do procedimento, bem como as atividades relacionadas a cada etapa, foram detalhadas nesta pesquisa. O procedimento metodológico *ProKnow-C*, utilizado para a revisão estruturada da literatura, é adequado ao objetivo da revisão, no entanto as etapas de construção demandam tempo. Além disso, é importante destacar que surgiram dificuldades no estabelecimento de critérios para análise sistêmica, devido à falta de maiores detalhes na literatura sobre esta etapa. A *Design Science Research*, ao apresentar de uma forma estruturada uma proposta de etapas constituintes de pesquisa que objetivam a criação e predição, apoiou no desenvolvimento do modelo proposto.

A concepção do modelo foi a fase do projeto de modelagem mais trabalhosa e que demandou maior tempo desta pesquisa. Esta etapa exigiu rigorosidade quanto ao embasamento científico, relacionado aos conceitos da simbiose industrial e de modelagem híbrida, bem como alinhamento com a realidade dos sistemas industriais. A criação do modelo seguiu um processo iterativo de desenvolvimento, pois à medida que os níveis de abstração foram sendo refinados, o modelo foi atualizado. Durante esta etapa de concepção, foi necessário utilizar os conceitos do tema de pesquisa, envolvendo a ecologia industrial e modelagem de sistemas complexos, e criar analogias com modelos identificados na literatura. A pesquisa para identificar os modelos existentes e avaliar a modelagem de sistemas em ambientes de simbiose industrial foi anteriormente publicada por esta autora (GUEDES; DE SOUZA; BORSATO, 2019).

Além da DSR para o desenvolvimento do artefato, esta pesquisa utilizou como guia os procedimentos de Montevechi et al. (2010) e Chwif & Medina (2010), os quais possuem como enfoque a modelagem para simulação. É importante destacar que para a efetiva construção do modelo, recorreu-se à literatura em busca de subsídio. E desta forma, foi detectada a existência apenas de procedimentos de apoio para o criar modelos individuais, com base apenas em eventos discretos, ou em modelos baseados em agentes, ou então em dinâmica de sistemas. Para

a modelagem híbrida, não foi encontrado um procedimento específico para nortear a pesquisa. Neste sentido, foram encontradas dificuldades na etapa de criação do modelo.

Durante a modelagem de dados foram encontradas dificuldades na consolidação de dados de entrada para simulação de cenários reais. Não há uma fonte de dados precisa e aberta quanto a geração de RSI no Estado do Paraná. Há falta de informações e aquelas que são disponibilizadas por vezes não são consistentes. Os órgãos responsáveis não seguem uma padronização em relação a exposição de dados, inviabilizando a interoperabilidade. A princípio nesta etapa, o intuito da presente pesquisa era utilizar apenas dados reais coletados nas indústrias. Contudo, devido à limitação da disponibilidade de dados, foi necessário coletar em outras fontes, como o *software* SIMAPRO. Para tanto, foram selecionados na base de inventários os processos que mais se aproximavam da realidade.

Para a etapa de implementação do modelo no *software Anylogic*, foi necessário desenvolver conhecimento da linguagem orientada a objetos, denominada Java. Apesar de o modelo possuir cenários diferentes, a lógica de programação é a mesma, criando assim um desafio maior na interação de códigos. Quanto a ferramenta do *Anylogic*, aponta-se que possui uma interface gráfica suficiente para apoiar o aprendizado e a demonstração de resultados.

Em relação aos resultados obtidos, a modelagem híbrida atende as necessidades de representação dos agentes e da dinâmica de produção. Enquanto a criação de agentes facilita no desenvolvimento de alternativas de tomadas de decisões, a dinâmica de sistemas permite visualizar a evolução da produção. Conclui-se que através da simulação de cenários é possível identificar quantitativamente os resultados de cada um dos cenários ao longo dos anos e, assim, tornar a tomada de decisão quanto a criação de redes de simbiose industrial por meio do direcionamento dos fluxos de RSI mais robusta.

As hipóteses inicialmente construídas na etapa de concepção do modelo, foram verificadas na etapa de demonstração dos resultados. As indústrias produzindo de forma linear, apresentam alto benefício econômico, porém com maior impacto ambiental. À medida em que conexões industriais são realizadas através de trocas de resíduos, o benefício econômico aumenta, ou se mantém, e o impacto ambiental diminui. A entrada no sistema de uma UVR apoia o ciclo de materiais e diminui o impacto ambiental, contudo o benefício econômico fica comprometido, já que o custo de materiais tratados é maior e dependem da localização geográfica desta unidade.

Na sequência do desenvolvimento do modelo, este foi avaliado ao nível de modelagem conceitual, pelo embasamento científico e contextualização real, e de simulação por informações de bases de conhecimento relevantes e da construção de cenários.

Como oportunidades de pesquisa para trabalhos futuros aponta-se a criação de um banco de dados que permita a interoperabilidade de dados de resíduos, em termos de classificação e características físico-químicas. Neste sentido, como complemento aponta-se como oportunidade, o desenvolvimento de um sistema inteligente artificial que permita inferir conexões entre indústrias para que as trocas de informações de materiais e a tomada de decisão sejam realizadas com maior velocidade. Sugere-se também o desenvolvimento de estudos acerca de pesos atribuídos para a qualificação e seleção de fornecedores em ambientes de simbiose industrial. Outra oportunidade de pesquisa constatada é a necessidade de desenvolvimento de um método para apoiar a criação de modelos híbridos. Além disso, é possível elaborar estudos com base em pesquisa operacional que permitam identificar a melhor localização de instalação de unidades para tratamentos de resíduos que assegurem a operação economicamente.

Aponta-se que durante o desenvolvimento desta pesquisa percebeu-se a necessidade de aprofundar conhecimentos sobre linguagens de programação, análise de dados, sistemas de informação e gestão do conhecimento para apoiar novos desenvolvimentos futuros.

A presente pesquisa atende o objetivo de desenvolver um modelo das interações entre fluxos de materiais, que permite avaliar alterações dinâmicas para apoiar a tomada de decisão quanto ao direcionamento de RSI e assim, estabelecer redes de simbiose industrial. Esta investigação apoia a ligação simbiótica entre indústrias, à medida em que propõe a adoção de RSI como insumos para outros processos, possibilitando assim a progressão no alcance dos objetivos de sustentabilidade.

Desta forma, este trabalho colabora com a minimização da problemática ambiental, ao propiciar a redução da exploração de recursos naturais, a geração de impactos ao meio ambiente, bem como a minimização dos problemas econômicos, ao racionalizar o uso de recursos e melhorar o ciclo de materiais. Além disso, alcança o intuito de apoiar a tomada de decisão para o direcionamento de RSI e melhorar a competitividade das indústrias, uma vez que atende aos novos requisitos do mercado. Por fim, ressalta-se que esta pesquisa contribui com a evolução do conhecimento científico no âmbito da manufatura sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABIB, G. A qualidade da informação para a tomada de decisão sob a perspectiva do sensemaking: uma ampliação do campo. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 39, n. 3, p.73-82, set./dez. 2010.
- ALBINO, V.; IZZO, C., KÜHTZ, S. Input–output models for the analysis of a local/global supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 78, n. 2, p. 119–31, 2002.
- ALLESCH, A.; BRUNNER, P. H. Material Flow Analysis as a Decision Support Tool for Waste Management: A Literature Review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 753-764, Oct 2015.
- ALZAMAN, C. Green supply chain modelling: literature review. **International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling**, v. 6, n. 1, p. 16-39, 2014.
- AMIN, S.H.; ZHANG, G. Closed-loop supply chain network configuration by a multiobjective mathematical model. **International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling**, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2014.
- ANGELONI, M. T. Elementos intervenientes na tomada de decisão. **Ci. Inf**, v. 32, n. 1, p. 17-22, 2003.
- ARCHANJO, C. R. **Estudo da percepção dos atores envolvidos nos processos operacionais das bolsas de resíduos das federações das indústrias**. Belo Horizonte, 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2008.
- ARENA, U.; DI GREGORIO, F. A waste management planning based on substance flow analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 54-66, 2014.
- ASHBY, A. Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature. **Supply Chain Management**, v. 17, n. 5, p. 497-516, 2012.
- ASHTON, W. Understanding the organization of Industrial ecosystems: a Social Network Approach. **Journal of Industrial Ecology**, v. 12, n. 1. Yale University, 2008.
- ASSEN, M. V. **Modelos de gestão: os 60 modelos que todo gestor deve conhecer**. 2a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 71 p.
- _____. **NBR 10.005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. 16 p.
- _____. **NBR 10.006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c. 3 p.

_____. **NBR 10.007**: amostragem de resíduos sólidos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d. 21 p.

BAI, L. et al. Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 502-512, 2015.

BALDWIN, J. S., et al. Modelling industrial ecosystems and the "problem" of evolution. **Progress in Industrial Ecology an International Journal**, v. 1, n. 1-3, p. 39-60, 2004.

BANKS, J. et al. **Discrete-event system simulation**. 3 ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.

BANSAL, P., MCKNIGHT, B. Looking forward, pushing back and peering sideways: analyzing the sustainability of industrial symbiosis. **Journal of Supply Chain Management**, v. 45, 2009.

BARBOSA, E. M. F. **Rotulagem Ambiental** – Rótulos ambientais e Análise do ciclo de vida (ACV), IBICIT, nov., 2001.

BARIONI, L.G. **Modelagem dinâmica e otimização metaheurística para apoio à tomada de decisões na recria e engorda de bovinos de corte**. Piracicaba, 2002. 100p. Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2002.

BATTEN, D. F. Fostering industrial symbiosis with agent-based simulation and participatory modeling. **Journal of Industrial Ecology**, v. 13, n. 2, p. 197–213, april, 2009.

BAUCH, C. **Lean Product Development enabling display**: Making Waste Transparent Munich. Thesis, Technical University of Munich. 2004.

BERKEL, R.V.; FUJITA, T.; HASHIMOTO, S.; GENGA, Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997–2006. **Journal of Environmental Management**, v. 90, 2008.

BESKE, P. Dynamic capabilities and sustainable supply chain management. **International Journal of Physical Distribution & Logistic Management**, v. 42, n. 4, p. 372-387, 2012.

BICHRAOUI, N.; GUILLAUME, B.; HALOG, A. Agent-based modelling simulation for the development of an industrial symbiosis-preliminary results. **Procedia Environmental Sciences**, v. 17, p. 195-204, 2013.

BOONS, F.A.A.; BAAS, L.W. Types of industrial ecology: the problem of coordination. **Journal of Cleaner Production**, v. 5, n. 1–2, p. 79–86, 1997.

BORSHCHEV, A. Multi-method modeling. In: **Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Making Decisions in a Complex World**. IEEE Press, p. 4089-4100, 2013.

BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: **Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society**. Oxford, 2004.

BRASIL. **Lei nº. 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 10/04/2018.

BRASIL. Resolução n. 313, de 29 de outubro de 2002. **Diário Oficial da União**, Brasília, 22 nov. 2002.

BRITO, T. B. **Aplicabilidade da simulação híbrida em sistemas logísticos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

CALVO, G.; VALERO, A.; VALERO, A. Material flow analysis for Europe: An exergoecological approach. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 603-610, 2016.

CAO, K.; FENG, X.; WAN, H. Applying agent-based modeling to the evolution of eco-industrial systems. **Ecological Economics**, v. 68, n. 11, p. 2868-2876, 2009.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA - (ESALQ/USP). **Informativo do Setor Florestal**, n. 213, setembro, 2019.

CHAN, W. K. V.; SON, Y. J.; MACAL, C. M. Agent-based simulation tutorial-simulation of emergent behavior and differences between agent-based simulation and discrete-event simulation. In: **Proceedings of the 2010 winter simulation conference**. IEEE, p. 135-150, 2010.

CHAN, F. T. S. et al. A decision support system for supplier selection in the airline industry. In: **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 221, n. 4, p. 741-758, 2007.

CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual review of energy and the environment**. v. 25, n. 1, p. 313-337, 2000.

CHERTOW, M. R. Uncovering industrial symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 11-30, 2007.

CHERTOW, M. R; PARK, J. Reusing Nonhazardous Industrial Waste Across Business Clusters. In: LETCHER, T. M.; VALLERO, D.A. **WASTE: A handbook for management**, p. 197, 2011.

CHERTOW, M. R.; EHRENFELD, J. Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis. **Journal of Industrial Ecology**, v..16, n.1, p. 13-27, 2012.

CHIAVENATO, I. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. 7. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 630 p.

CHIAVENATO, I. **Administração: Teoria, Processo e Prática**. Elsevier Editora. 3 ed. 2007.

CHOUDHARY, D.; SHANKAR, R. Joint decision of procurement lot-size, supplier selection, and carrier selection. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 19, n. 1, p. 16-26, 2013.

CHRISTOPHER, M. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**: criando redes que agregam valor. [tradução Mauro de Campos Silva] – 2ª ed – São Paulo: Thomson Learning, 2007.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**: Teoria e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Editora dos Autores, 2010.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE. **Preço do material reciclável**. Disponível em: < <http://cempre.org.br>>. Acesso em: 20/09/2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS. **Pesquisa CNI IBOPE**: retratos da sociedade brasileira : meio ambiente. Brasília: CNI, 51 p., maio 2012. Disponível em : < <http://www.cni.org.br> >. Acesso em: 22/05/2018.

_____. **Portal da Indústria**. Perfil da Indústria do Paraná. Disponível em: <<http://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br>>. Acesso em: 10/08/2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº. 313, de 29 de outubro de 2002. Disponível em:<<http://www2.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 15/04/2018.

ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 35, n. 1, p. 77-87, jan 2011.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

DARGI, A., et al. Supplier selection: A fuzzy-ANP approach. *Procedia Computer Science*, v. 31, p. 691-700, 2014.

DE BOER, L.; LABRO, E.; MORLACCHI, P. A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, v. 7, n. 2, p. 75-89, 2001.

DE MEDEIROS, L. F.; MOSER, A.; DOS SANTOS, N. A simulação computacional como técnica de pesquisa na administração. *Revista Intersaberes*, v. 9, n. Espec, p. 463-485, 2015.

DEMAJOROVIC, J. Ecoeficiência em serviços: diminuindo impactos e aprimorando benefícios ambientais. In: VILELA JÚNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos e ferramentas de gestão ambiental**: desafios e perspectivas para as organizações. São Paulo: Editora Senac, p. 169-200, 2013.

DEMARTINI, M.; BERTANI, F.; TONELLI, F. AB-SD Hybrid Modelling Approach: A Framework for Evaluating Industrial Sustainability Scenarios. In: **International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing**. Springer, Cham, p. 222-232, 2018.

DESPEISSE, M. et al. Industrial ecology at factory level: a prototype methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, v. 226, n. A10, p. 1648-1664, Oct 2012a.

DESPEISSE, M. et al. Industrial ecology at factory level—a conceptual model. **Journal of Cleaner Production**, v. 31, p. 30-39, 2012b.

DESPEISSE, M.; OATES, M. R.; BALL, P. D. Sustainable manufacturing tactics and cross-functional factory modelling. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 31-41, Mar 2013.

DE SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. **Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools**. Troubador publishing ltd, 2007.

DEUTZ, P. Producer responsibility in a sustainable development context: ecological modernisation or industrial ecology? **The Geographical Journal**, v. 175, n. 4, p. 274-285, Dec. 2009.

DIAS, R. **Gestão ambiental**. Responsabilidade social e sustentabilidade. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

DOS SANTOS, R. N. M. Métodos e ferramentas para a gestão de inteligência e do conhecimento. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 5, n. 2, 2007.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR., J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, 2015.

DUNN, B. C.; STEINEMANN, A. Industrial Ecology for Sustainable Communities. **Journal for Environmental Planning and Management**, v. 41, n. 6, p. 661-672, 1998.

DYSON, R. G. Strategic Development and SWOT Analysis at the University of Warwick, **European Journal of Operational Research**, v. 152, p. 631–640, 2004.

EDTMAYR, T.; SUNK, A.; SIHN, W. An Approach to Integrate Parameters and Indicators of Sustainability Management into Value Stream Mapping. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 289-294, 2016.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; PINTO, H. M. Processo de investigação e Análise bibliométrica: Avaliação da Qualidade dos Serviços Bancários. **RAC-Revista de Administração Contemporânea**, v. 17, n. 3, p. 325-349, 2013.

ERKMAN, S. Industrial ecology: a historical view. **Journal of Cleaner Production**. v.5, n.1-2, p.1-10, 1997.

EUROPEAN COMMISSION. Restriction of Hazardous Substances Directive (2002/96/EC). **Official Journal of the European Union**, L37/19, 2003.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ - FIEP. **Pesquisa conjuntural da indústria**. Indicadores Conjunturais. Jan., 2019. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/>>. Acesso em: 20/08/2019.

FLORENT, T. M.; ZHEN, H. Study on the supplier evaluation index system of lean supply chain. In: **2010 International Conference on e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning**. IEEE, p. 47-51, 2010.

FORRESTER, J. W. **Principles of Systems**, Wright. Allen Press, Inc., Cambridge, v. 1, n. 968, p. 51, 1968.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. 2. ed. p. 372. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FRÖHLING, M. et al. A Material Flow-based Approach to Enhance Resource Efficiency in Production and Recycling Networks. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 1, p. 5-19, 2013.

FROSCH, R. A.; GALLOPOULOS, N. E. Strategies for manufacturing. **Scientific American**, v. 261, n. 3, p. 144-152, 1989.

GHALI, M. R.; FRAYRET, J. M.; AHABCHANE, C. Agent-based model of self-organized industrial symbiosis. **Journal of cleaner production**, v. 161, p. 452-465, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002. 4ª Edição.

GLAVIC P.; LUKMAN R. Review of sustainability terms and their definitions, **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1875-1885, 2007.

GOULD, O. et al. A Material Flow Modelling Tool for Resource Efficient Production Planning in Multi-product Manufacturing Systems. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 21-26, 2016.

PARANÁ. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná**. Relatório contendo a situação dos resíduos sólidos. Dezembro, 2017. Disponível em: < <http://www.residuossolidos.sema.pr.gov.br/>>. Acesso em: 10/06/2019.

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. **Industrial Ecology**. Eds.. Prentice Hall, 1995.

GRAEDEL, T. Industrial ecology: definition and implementation. In: SOCOLOW, R., ANDREWS, C., BERKHOUT, F., THOMAS, V. (Eds.). **Industrial Ecology and Global Change**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 23-41, 1994.

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY, B. R. **Industrial Ecology and Sustainable Engineering: International Edition**. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, Prentice Hall, 2010.

GRIGORYEV, I. AnyLogic 7 in three days. **A quick course in simulation modeling**, v. 2, 2015.

GUEDES, G. B.; DE SOUZA, V. M.; BORSATO, M. An Evaluation of the Industrial Symbiosis Systems Modeling. In: K. Hiekata et al. (Eds.), **Advances in Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems**. Proceedings of the 26th ISTE International Conference on Transdisciplinary Engineering, July 30 – August 1, p. 635-644, 2019.

GUEDES, G. B.; PAGANIN, L. B. Z.; BORSATO, M. Bibliometric and systemic analysis on material flow mapping and industrial ecosystems. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 3, n. 04, p. 1850001, 2018.

GUIMARÃES, E. M. P.; ÉVORA, Y. D. M. Sistema de informação: instrumento para tomada de decisão no exercício da gerência. **Ciência da Informação, Brasília**, v. 33, n. 1, p. 72-80, 2004.

HASHEMI, S. H.; KARIMI, A.; TAVANA, M. An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 159, p. 178-191, 2015.

HELAL, M. **A hybrid system dynamics-discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise**. Doctoral Thesis. Department of Industrial Engineering and Management Systems, University of Central Florida. 2008.

HEVNER, A.R. et al. Design science in Information Systems Research. **MIS Quarterly**, v.28, n. 1, p. 75-105, Mar 2004.

IACOVIDOU, E.; VELENTURF, A. P. M.; PURNELL, P. Quality of resources: A typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example. **Science of the total environment**, v. 647, p. 441-448, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA 2012. **Lista Brasileira de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>> Acesso em: 15/05/2018.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ - IAP. **Relatório da situação do inventário de resíduos sólidos industriais no estado do Paraná**. Dezembro, 2016. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br>>. Acesso em: 20/05/2018.

_____. **Monitoramento da qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.iqa.pr.gov.br>> . Acesso em: 25/08/2019.

_____. **Sistema de gestão ambiental**. Consulta de processo de licenciamento. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br>>. Acesso em: 10/05/2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Classificação Nacional de Atividades Econômicas**. Disponível em:< <https://concla.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 05/06/2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos industriais: relatório de pesquisa**. 2012. Disponível em: <www.ipea.gov.br>. Acesso em: 30/05/2018.

ISENMANN, R. Industrial ecology: shedding more light on its perspective of understanding nature as model. **Sustainable Development**, v.11, p.143-158, June 2003.

ISHIZAKA, A.; PEARMAN, C.; NEMERY, P. AHPSort: an AHP-based method for sorting problems. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 17, p. 4767-4784, 2012.

IZQUIERDO, et al. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *EMPIRIA. Revista de Metodología de las Ciencias Sociales*, v. 16, p. 85-112, 2008.

JABBOUR, A. B. L. S.; JABBOUR, C. J. C. Are supplier selection criteria going green? Case studies of companies in Brazil. *Industrial Management & Data Systems*, v. 109, n. 4, p. 477-495, 2009.

JACOBI, P. **Gestão compartilhada dos resíduos sólidos no Brasil**. Inovação com inclusão social. São Paulo. SP. Editora Anna Blume, 2006.

JAIN, R.; SINGH, A. R.; MISHRA, P. K. Prioritization of Supplier Selection Criteria: A Fuzzy-AHP Approach. *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, v. 3, n. 1, p. 34-42, jan. 2013.

JANSSEN M.; OSTROM, E. Governing social-ecological systems. In: Tesfatsion L.; Judd KL. – **Handbook of computational economics**, v. 2. Ed. Elsevier, 2006.

JAYACHANDRAN R. et al. The Design of a Sustainable Manufacturing System: A case study of its importance to product variety manufacturing. In: **Intelligent Production Machines and Systems**. United Kingdom: Elsevier, 2006

JIN, G. Z. et al. Characteristics and emission factors of PCDD/Fs in various industrial waste in South Korea. *Chemosphere* **75**, p. 1226-1231, 2009.

KANNAN, D.; GOVINDAN, K.; RAJENDRAN, S. Fuzzy Axiomatic Design approach based green supplier selection: a case study from Singapore. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 194-208, 2015.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena**. 2 ed. New York/USA: McGraw-Hill Companies, 2002.

KHATTAK, S. H. et al. An exergy based approach to resource accounting for factories. *Journal of Cleaner Production*, v. 121, p. 99-108, May 2016.

KUCZENSKI, B. et al. Material flow analysis of polyethylene terephthalate in the US, 1996-2007. *Resources Conservation and Recycling*, v. 54, n. 12, p. 1161-1169, Oct 2010.

KURDVE, M. et al. Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: a case study approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 98, p. 304-315, Jul 2015.

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

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3a. Ed. Editora. McGraw-Hill Books, NY, 2000.

LENZEN, M.; REYNOLDS, C. J. A Supply-Use Approach to Waste Input-Output Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, v. 18, n. 2, p. 212-226, Apr 2014.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação da eficiência e aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume**. 2002. 175f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

LIMA JUNIOR, F. R. ; OSIRO, L. ; CARPINETTI, L. C. R. Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte. **Gestão & Produção**, v. 20, p. 781-801, 2013.

LOMBARDI, D. R.; LAYBOURN, P. Redefining industrial symbiosis – crossing academic-practitioner boundaries. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 1, p. 28-37, 2012.

LOWE, E. A.; EVANS, L. K. Industrial ecology and industrial ecosystems. **Journal of cleaner production**, v. 3, n. 1, p. 47-53, 1995.

LUTHRA, S., et al. An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1686-1698, 2017.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Agent-Based Modeling And Simulation. In: **Winter Simulation Conference**, p. 87-98, 2009.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 4, p. 151–162, 2010.

MAFAKHERI, F.; BRETON, M.; GHONIEM, A. Supplier selection-order allocation: A two-stage multiple criteria dynamic programming approach. **International Journal of Production Economics**, v. 132, n. 1, p. 52-57, 2011.

MAIMON, O.; ROKACH, L. Introduction to Knowledge Discovery and Data Mining. In: **Data Mining and Knowledge Discovery Handbook**, p. 1-15. Israel: Springer, 2010.

MAKISHI, F. **Criação de valor compartilhado na cadeia de reciclagem: processamento dos resíduos da comercialização do coco verde**. Pirassununga, 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, 2012.

MANN, H. et al. Drivers of Sustainable Supply Chain Management. **IUP Journal of Operations Management**. v. 9, n. 4, p. 52, 2010.

MANTESE, G. C.; AMARAL, D. C. Comparison of industrial symbiosis indicators through agent-based modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1652-1671, 2017.

MANTESE, G. C.; AMARAL, D. C. Agent-based simulation to evaluate and categorize industrial symbiosis indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 450-464, 2018.

MARIA, A. Introduction To Modeling And Simulation. **Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference**, p. 7-13, 1997.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.

MATHIEUX, F.; BRISSAUD, D. End-of-life product-specific material flow analysis. Application to aluminum coming from end-of-life commercial vehicles in Europe. **Resources Conservation and Recycling**, v. 55, n. 2, p. 92-105, Dec 2010.

MAXIMIANO, A. C. A. **Introdução à Administração**. Ed. Compacta. São Paulo: Atlas, 2009. 294p.

MCKEOWN R. **The Education for Sustainable Development**. Toolkit 2002. Disponível em: <www.esdtoolkit.org>. Acesso em: 10/06/2018.

MENG, X.; WEN, Z.; QIAN, Y. Multi-agent based simulation for household solid waste recycling behavior. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 535-545, 2018.

MILLER, I; KOSSIK, R; VOSS, C. **General requirements for simulation models in waste management**. Golder Associates Inc, 200-18300 Union Hill Road NE, Redmond, WA 98052 (US), 2003.

MONTEVECHI, J. A. B., et al. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference**. Baltimore: IEEE. 2010.

MOREIRA, M.S. **Estratégia e implantação de sistema de gestão ambiental: Modelo ISO 14001**. 2ªed. Belo Horizonte: Desenvolvimento gerencial, 2001.

MORITZ, G. O; PEREIRA, F. **Processo decisório**. Florianópolis: SEAD/UFSC, 2006.

MOURTZIS, D., et al. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook. **International journal of computer integrated manufacturing**, v. 28, n. 1, p. 3-24, 2015.

MOUZON, G.; YILDIRIM, M.B.; TWOMEY, J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. **International Journal of Cleaner Production**, v. 45, n. 18-19, p. 4247-4271, 2007.

NAIME, R.; GARCIA, A. C. A. **Percepção ambiental e diretrizes para compreender a questão do meio-ambiente**. Novo Hamburgo: Feevale, 2004. 136p.

NAKAMURA, S. et al. MaTrace: Tracing the Fate of Materials over Time and Across Products in Open-Loop Recycling. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 13, p. 7207-7214, Jul 1 2014.

OLIVEIRA, A. L. B. **Bolsa de Resíduos, um instrumento de Gerenciamento de Resíduos decorrentes de atividades produtivas**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção Química) Faculdade de Ciência e Tecnologia, Salvador, BA. 2006.

OLIVEIRA, J. G.; BORGES, F. H.; JABBOUR, C. C. Avaliação de desempenho no âmbito da gestão ambiental na organização. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - SIMPEP, XII, Bauru. 2005. **Anais**. Bauru: XII Simpósio de Engenharia de Produção.

OLIVEIRA, M. G. **Auditoria de Resíduos Sólidos com Foco no Gerenciamento, Prevenção e Minimização em uma Indústria de Descartáveis Plásticos.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental. 2011. 195 f. Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

ORDOOBADI, S. M. Application of AHP and Taguchi loss functions in supply chain. **Industrial Management & Data Systems**, v. 110, n. 8, p. 1251-1269, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. **Brasil**, fev. 2016. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 10/10/2018.

OSIPENKO, L.; FARR, J. System dynamics and dynamic systems integration in **regulatory environments**. In: System Dynamics Society Conference. 2004.

PAJU, M., et. al. Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. In: **Proceedings of the 2010 winter simulation conference**, p. 3411-3422. IEEE. December, 2010.

PARK, J. A. et al. Dynamic material flow analysis of steel resources in Korea. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 4, p. 456-462, 2011.

PEGDEN, C.D.; SHANNON, R.E.; SADOWSKI, R.P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc. 600 p., 1995.

PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of management information systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PEREIRA, T. F., MONTEVECHI, J. A. B., MIRANDA, R. C. Gestão do conhecimento em projetos de simulação: uma abordagem da espiral do conhecimento. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 33, 2013, Salvador, **Anais**, Salvador, 2013, 19p.

PERERA, T.; K. LIYANAGE. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v. 7, n. 7, p. 645-656, 2000.

PHILIPPI JUNIOR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** Barueri, SP: Manole, 2005. 842p

PINHEIRO, J. M. S. **Da iniciação científica ao TCC: uma abordagem para os cursos de tecnologia.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

PROSMAN, E. J. **Supply chain capabilities for industrial symbiosis: Lessons from the cement industry.** Tese de Doutorado. Aalborg Universitetsforlag, 2018.

PRICE WATER HOUSE COOPERS – PWC. **Estudo sobre o setor de tratamento de resíduos industriais.** [s.l.]: PwC, 2006.

REBITZER, G. *et al.* Life Cycle Assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environmental International** 30, p. 701-720. Science Direct, 2004.

ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the operational research society**, v. 59, n. 3, p. 278-290, 2008.

ROMERO, E.; RUIZ, M. C. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 5, p. 731-741, 2013.

ROMERO, E.; RUIZ, M. C.. Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems. **Science of the Total Environment**, v. 468, p. 394-405, 2014.

ROBBINS, S.; JUDGE, T.; SOBRAL, F. **Comportamento organizacional: teoria e prática no contexto brasileiro**. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 633 p.

RYBICKA, J. et al. Capturing composites manufacturing waste flows through process mapping. **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 251-261, Mar 2015.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Simulação baseada em agentes (SBA) para modelagem de operações. **Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais**. 2009.

SAMUELSON, D. A.; MACAL, C. M. Agent-based simulation comes of age. **OR MS TODAY**, v. 33, n. 4, p. 34, 2006.

SANAYEI, A. et al. An integrated group decision-making process for supplier selection and order allocation using multi-attribute utility theory and linear programming. **Journal of the Franklin Institute**, v. 345, n. 7, p. 731-747, 2008.

SAVITZ, A.; WEBER, K. **A empresa sustentável**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

SAWIK, T. Single vs. multiple objective supplier selection in a make to order environment. **Omega**, v. 38, n. 3-4, p. 203-212, 2010.

SERVIÇO DE ACOMPANHAMENTO DA OPINIÃO PÚBLICA. Meio ambiente e desenvolvimento sustentável. **DataSenado**, São Paulo, 20 jun. 2012. Disponível em: < <http://https://www12.senado.leg.br/institucional/datasenado>>. Acesso em: 23/05/2018.

SLIFE, B. D.; WILLIAMS, R. N. **What's behind the research?:** Discovering hidden assumptions in the behavioral sciences. Sage, 1995.

SILVA, C. E. S., et. al. Integration of computer simulation in design for manufacturing and assembly. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 10, p. 2851-2866, 2014.

SILVA, E. M. M., et al. Simulação híbrida no processo produtivo do palmito de pupunha. XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, **Anais**, p. 3269-3280, agosto, 2015.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial** (3rd Ed.). MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1996.

SMITH, L.; BALL, P. Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 227-238, november, 2012.

SMITH, R. L. et al. An industrial ecology approach to municipal solid waste management: I. Methodology. **Resources Conservation and Recycling**, v. 104, p. 311-316, Nov 2015.

SOPHA, B. M.; FET, A. M.; KEITSCH, M. M.; HASKINS, C. Using system engineering to create a framework for evaluating industrial symbiosis options. **System Engineering**, v. 13, n. 2, p. 149-160, 2010.

SRIVASTAVA, S.K. Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**. v. 9, n. 1, p. 53-80, 2007.

STANISAVLJEVIC, N.; BRUNNER, P. H. Combination of material flow analysis and substance flow analysis: A powerful approach for decision support in waste management. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 8, p. 733-744, Aug 2014.

STERMAN, John. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. **ESD Internal Symposium**. Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, 2002.

TALENS PEIRO, L.; VILLALBA MENDEZ, G.; AYRES, R. U. Material Flow Analysis of Scarce Metals: Sources, Functions, End-Uses and Aspects for Future Supply. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 6, p. 2939-2947, Mar 19 2013.

TASHAKKORI, A.; CRESWELL, J. W. Exploring the nature of research questions in mixed methods research. **Journal of Mixed Methods Research**, v. 1, p. 207–211, 2007.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Realizing the future we want for all**: report to the secretary-general. New York, jun. 2012. Disponível em: < <http://www.undp.org> >. Acesso em: 20/03/2018.

VAN AKEN, J. E. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field tested and grounded technological rules. **Journal of Management Studies**, v.41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VAN AKEN, J. E.; BERENDS, H.; BIJ, H. VAN DER. **Problem Solving in Organizations**. 2. ed. United Kingdom, Cambridge: University Press Cambridge, 2012

VERCELLIS, C. **Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making**. Politecnico di Milano, Italy: A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. 2009.

VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, H. C.; HENDRIKS, C. F. Allocation in recycling systems. **The international journal of life cycle assessment**, v. 6, n. 6, p. 344, 2001.

WANG, G., FENG, X.; CHU, K. H. A novel approach for stability analysis of industrial symbiosis systems. **Journal of Cleaner Production**, v.39, p. 9-16, 2013.

WEBER, C. A.; CURRENT, J. R.; BENTON, W. C. Vendor selection criteria and methods. **European Journal of Operational Research**, v. 50, p. 2-18, 1991.

WEISS, G. (Ed.). **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. MIT press, 1999.

WHITE, R. Preface. **The Greening of Industrial Ecosystems**. Edited by B. Allenby and D. Richards, Washington, D.C.: National Academy Press, 1994.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 3 ed. California: Duxbury Press, 1993.

WORLD BUSSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Eco-efficiency: creating more value with less impact**. Genebra, ago. 2000. Disponível em: < <http://www.wbcds.org> >. Acesso em: 21/03/2018.

WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future: a report of the world commission on environment and development**. United Nations, Oslo, 1987. Disponível em: < <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> >. Acesso em: 15/03/2018.

XAVIER, P. **Resíduos recicláveis como fator de relevância econômica, financeira e social em municípios paranaenses de pequeno e médio porte**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Lactec e Instituto de Engenharia do Paraná. 2013.

YAMAGUTI, M. **Proposta de um processo de qualificação e avaliação dos fornecedores de uma empresa globalizada**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Produção. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008, 149p.

YAZAN, D. M; ROMANO, V. A.; ALBINO, V. The design of industrial symbiosis: an input-output approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 537-547, 2016.

YAZDANI, M., et al. Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3728-3740, 2017.

ZHENG, H., et al. **A primer for agent-based simulation and modeling in transportation applications**. United States. Federal Highway Administration, n. FHWA-HRT-13-054, 2013.

ZURBRÜGG, C. et al. Determinants of sustainability in solid waste management – The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia. Elsevier, **Waste Management**, v. 32, n. 11, p. 2126-2133, Indonésia, nov, 2012.

ANEXO – Classificação de resíduos sólidos

Código do Resíduo	Classe II ou III
A001	Resíduos de restaurante (restos de alimentos)
A002	Resíduos gerados fora do processo industrial (escritório, embalagens, etc.)
A003	Resíduos de varrição de fábrica
A004	Sucata de metais ferrosos
A104	Embalagens metálicas (latas vazias)
A204	Tambores metálicos
A005	Sucata de metais não ferrosos (latão, etc.)
A105	Embalagens de metais não ferrosos (latas vazias)
A006	Resíduos de papel e papelão
A007	Resíduos de plásticos polimerizados de processo
A107	Bombonas de plástico não contaminadas
A207	Filmes e pequenas embalagens de plástico
A008	Resíduos de borracha
A108	Resíduos de acetato de etil vinila (EVA)
A208	Resíduos de poliuretano (PU)
A308	Espumas
A009	Resíduos de madeira contendo substâncias não tóxicas
A010	Resíduos de materiais têxteis
A011	Resíduos de minerais não metálicos
A111	Cinzas de caldeira
A012	Escória de fundição de alumínio
A013	Escória de produção de ferro e aço
A014	Escória de fundição de latão
A015	Escória de fundição de zinco
A016	Areia de fundição
A017	Resíduos de refratários e materiais cerâmicos
A117	Resíduos de vidros
A018	Resíduos sólidos compostos de metais não tóxicos
A019	Resíduos sólidos de estações de tratamento de efluentes contendo material biológico não tóxico
A021	Resíduos sólidos de estações de tratamento de efluentes contendo substâncias não tóxicas
A022	Resíduos pastosos de estações de tratamento de efluentes contendo substâncias não tóxicas
A023	Resíduos pastosos contendo calcário
A024	Bagaço de cana
A025	Fibra de vidro
A099	Outros resíduos não perigosos
A199	Aparas salgadas

A299	Aparas de peles caleadas
A399	Aparas, retalhos de couro atanado
A499	Carnaça
A599	Resíduos orgânico de processo (sebo, soro, ossos, sangue, outros da indústria alimentícia, etc)
A699	Casca de arroz
A799	Serragem, farelo e pó de couro atanado
A899	Lodo do caleiro
A999	Resíduos de frutas (bagaço, mosto, casca, etc.)
A026	Escória de jateamento contendo substâncias não tóxicas
A027	Catalisadores usados contendo substâncias não tóxicas
A028	Resíduos de sistema de controle de emissão gasosa contendo substâncias não tóxicas (precipitadores, filtros de manga, entre outros)
A029	Produtos fora da especificação ou fora do prazo de validade contendo substâncias não perigosas

Fonte: BRASIL (2002)