



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ÍTALO RUAN BARBOSA DE AQUINO

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE
PONTOS DE COLETA DE RESÍDUOS ELÉTRICOS E ELETROELETRÔNICOS NA
CIDADE DE CARUARU - PE**

Caruaru

2019

ÍTALO RUAN BARBOSA DE AQUINO

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE
PONTOS DE COLETA DE RESÍDUOS ELÉTRICOS E ELETROELETRÔNICOS NA
CIDADE DE CARUARU - PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof^o. Dr. Lúcio Camara e Silva.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

A657p Aquino, Ítalo Ruan Barbosa de.
Proposição de um modelo matemático para localização de pontos de coleta de resíduos elétricos e eletroeletrônicos na cidade de Caruaru-PE. / Ítalo Ruan Barbosa de Aquino. – 2019.
65 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Lúcio Camara e Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências.

1. Coleta seletiva de lixo - Caruaru (PE). 2. Modelos matemáticos. 3. Gestão integrada de resíduos sólidos – Caruaru (PE). 4. Cadeia de logística integrada - Caruaru (PE). 5. Controle de custo – Caruaru (PE). 6. Aparelhos e materiais elétricos – Caruaru (PE). I. Silva, Lúcio Camara e (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-248)

ÍTALO RUAN BARBOSA DE AQUINO

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE
PONTOS DE COLETA DE RESÍDUOS ELÉTRICOS E ELETROELETRÔNICOS NA
CIDADE DE CARUARU - PE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 11/09/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lúcio Camara e Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.ª Dr.ª Maísa Mendonça Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.ª Dr.ª Vanessa Batista Schramm (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me ajudado a chegar até aqui. Ele é a minha força e o meu refúgio e sem Ele eu não conseguiria atravessar e findar esta etapa.

À minha mãe e ao meu pai pelo apoio manifesto de diversas formas durante o tempo da realização deste curso, pela preocupação de sempre quererem o meu melhor, por estarem sempre do meu lado e acima de tudo pelo amor indescritível demonstrado à constância.

Agradeço ao meu orientador, professor Doutor Lúcio Camara e Silva, pela dedicação, atenção, disposição, transparência, trabalho, apoio, companheirismo, dentre outras relevantes contribuições, para que fosse possível alcançar esta fase.

Também presto meus agradecimentos aos colegas e amigos pelos momentos de ajuda e apoio, inclusive os meus companheiros de mestrado que estiveram comigo desde a graduação.

À FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Grupo de Pesquisa em Sistema de Informação e Decisão (GPSID) pelo apoio financeiro e recursal.

Por fim, presto minha gratidão a todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para minha formação. A vocês, meu muito obrigado.

“O temor do SENHOR é o princípio da ciência”. (BÍBLIA, Provérbios, 1: 7).

RESUMO

Em face aos impactos ambientais produzidos pelo crescente aumento dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (REEE) e à vigente gestão inadequada dos mesmos, este artigo propõe um modelo matemático para definir a melhor localização para instalação de pontos de coleta de REEE. O modelo integra a problemática da localização dos pontos de coleta com a roteirização dos veículos que realizarão o recolhimento. O objetivo é minimizar o custo do sistema logístico reverso com relação ao transporte, instalação, custo de oportunidade e distância entre os pontos e a demanda. O *software* Evolver 7.6 foi utilizado para resolução do modelo, executando-o em dois cenários-teste em um bairro da cidade de Caruaru – PE, com diferenças na disponibilidade de veículos, demanda e capacidade. No primeiro cenário, três veículos com pequena carga devem realizar a coleta em três pontos. O tempo de execução para este cenário foi de 33 minutos, aproximadamente. No segundo, um veículo com maior capacidade disponível deve efetuar a coleta em quatro pontos. Neste caso, o tempo de execução foi de aproximadamente 15 minutos. Os resultados obtidos mostram que o modelo matemático é adequado para resolver o problema. Assim, entende-se que o método proposto contribui para a literatura, haja vista a criticidade do cenário atual com relação à gestão de REEE.

Palavras-chave: Pontos de coleta. Localização. Modelagem matemática. Resíduos de equipamentos elétricos e eletroeletrônicos.

ABSTRACT

Due to the environmental impacts produced by the increasing number Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and the current inadequate management of them, this paper proposes a mathematical model to define the best location for installation of WEEE collection points. The model integrates the problem of the location of the collection points with the routing of the vehicles that will perform the collection. The objective is to minimize the cost of the reverse logistics system in relation to transportation, installation, opportunity cost and distance from collection points to demand. Evolver 7.6 software was used as a computational tool to solve the model, which was performed in two test scenarios in a neighborhood of Caruaru - PE, with different vehicle availability, demand and capacity. Firstly, three vehicles with a low load should perform the collection in three points. The execution time for this scenario was approximately 33 minutes. Then, a vehicle with greater capacity available should collect in four points. In this case, the execution time was approximately 15 minutes. The results obtained show that the mathematical model is adequate to solve the problem. Thus, it is understood that the proposed method contributes to the literature, given the criticality of the current scenario in relation to WEEE management.

Keywords: Collection points. Location. Mathematical modeling. E-waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 –	Alguns elementos presentes em REEE e seus efeitos negativos.....	21
Mapa 1 –	Distribuição dos Recicladores de REEE no Brasil.....	24
Fluxograma 1 –	Fluxograma esquemático demonstrando as rotas de REEE no Brasil.....	25
Quadro 2 –	Meta-heurísticas por áreas da Logística Reversa.....	28
Gráfico 1 –	As meta-heurísticas mais usadas para resolver problemas de localização/ alocação.....	36
Mapa 2 –	Bairro Maurício de Nassau, Caruaru – PE.....	46
Mapa 3 –	Rota a ser percorrida pelo veículo.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Distâncias (em km) entre os locais candidatos a ponto de coleta.....	47
Tabela 2 –	Distâncias (em km) entre os nós de demanda e os locais candidatos a ponto de coleta.....	47
Tabela 3 –	Custos de transporte entre os pontos candidatos (T_{ijk}).....	48
Tabela 4 –	Custos da distância entre os nós de demanda e os pontos candidatos a pontos de coleta (S_{id}).....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	13
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	A GESTÃO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETROELETRÔNICOS (REEE).....	16
2.1.1	A Logística Reversa.....	16
2.1.1.1	O Problema de Roteamento de Veículos.....	17
2.1.1.2	O Problema do Desenho da Rede Logística.....	18
2.1.1.3	O Problema do Planejamento da Produção.....	18
2.1.1.4	O Problema da Montagem e Desmontagem.....	19
2.1.1.5	O Problema do Gerenciamento de Devoluções.....	19
2.1.1.6	O Problema do Gerenciamento de Estoques.....	19
2.1.1.7	O Problema de Localização e Alocação.....	20
2.1.2	Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (REEE).....	20
2.1.3	A gestão de REEE no Brasil.....	22
2.1.3.1	A gestão de REEE no Estado de Pernambuco.....	25
2.2	O USO DA PESQUISA OPERACIONAL NO SUPORTE À GESTÃO DE REEE.....	26
2.2.1	Métodos heurísticos de solução utilizados na gestão de REEE.....	27
2.2.1.1	Busca Tabu (<i>Tabu Search</i> – TS).....	28
2.2.1.2	Algoritmos Genéticos (<i>Genetic Algorithms</i> – GAs).....	28
2.2.1.3	Otimização de Colônia de Formigas (<i>Ant Colony Optimization</i> – ACO).....	29
2.2.1.4	Recozimento Simulado (<i>Simulated Annealing</i> – SA).....	30
2.2.1.5	GRASP (<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>).....	31
2.2.1.6	Método de Pesquisa em Vizinha Variável (<i>Variable Neighborhood Search</i> – VNS).....	31
2.2.1.7	Otimização por Enxame de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i> – PSO).....	32

2.2.2	Modelagem Matemática para Localização de Pontos de Coleta de Resíduos.....	32
2.2.2.1	Métodos Exatos de Localização.....	33
2.2.2.2	Métodos Heurísticos de Localização.....	36
2.2.2.3	Métodos de Simulação para Localização.....	37
3	MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE COLETA DE REEE EM CARUARU – PE.....	38
3.1	PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	39
3.2	EXECUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	45
4	DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A – PARTE DA INTERFACE DO PROBLEMA NO SOFTWARE EVOLVER 7.6.....	62
	APÊNDICE B – PROGRESSO NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA NO SOFTWARE EVOLVER 7.6.....	63
	APÊNDICE C – RELATÓRIO DO RESULTADO PARA O PRIMEIRO CENÁRIO.....	64
	APÊNDICE D – RELATÓRIO DO RESULTADO PARA O SEGUNDO CENÁRIO.....	65

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, é notório o crescente uso de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (EEE), intensificado pelo avanço da tecnologia. Esse crescimento mudou significativamente os padrões de consumo das sociedades modernas, levando a uma maior penetração de EEE no dia a dia dos consumidores e, posteriormente, ao rápido aumento das quantidades de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) (ACHILLAS *et al.*, 2010).

Os REEE, também conhecidos como *e-waste*, têm sido reconhecidos como uma problemática do ponto de vista ambiental, já que há um aumento crescente de sua quantidade a cada ano em todo o mundo, os quais contêm, em sua composição, substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente (SIGRIST *et al.*, 2015; WALTHER *et al.*, 2010). Assim, ainda que o gerenciamento desse tipo de resíduo seja uma tarefa desafiadora para todas as partes interessadas, eles possuem, por outro lado, um alto potencial de reciclagem de matérias-primas, trazendo benefícios para o meio ambiente e para as receitas das empresas recicladoras (NOWAKOWSKI, 2017; NOWAKOWSKI *et al.*, 2017). As empresas são beneficiadas, pois os produtos devolvidos podem fornecer componentes e materiais mais baratos, resultando também em economia nos custos de energia, produção e transporte. Os benefícios ambientais estão na recuperação dos materiais e componentes, reduzindo a necessidade de novos recursos (virgens) e evitando o aterro dos resíduos (HABIBI *et al.*, 2017a).

A fim de tratar esses resíduos em constante crescimento, foram tomadas medidas em forma de leis, dentre elas, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estruturada para obrigar o estabelecimento da logística reversa para o reaproveitamento dos REEE e a Lei Nº 15.084, de 6 de setembro de 2013, que obriga as empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte, no estado de Pernambuco, a instalarem coletores de lixo eletrônico (BRASIL, 2010; PERNAMBUCO, 2013).

Neste contexto de logística reversa, que trata do retorno dos resíduos, várias questões são abordadas, as quais são classificadas em sete áreas: o problema de roteamento dos veículos de coleta dos resíduos, o desenho da rede logística (envolve seleção de locais de instalações, a capacidade dessas instalações, etc.), localização e alocação (objetiva encontrar a melhor localização para as instalações), planejamento da produção, montagem e desmontagem (envolve manutenção, remanufatura, reciclagem ou descarte), gerenciamento de devoluções e gestão de estoque (RACHIH *et al.*, 2018). Dessa forma, somando-se o fato de

haver várias questões que estão envolvidas na gestão dos resíduos, juntamente com a imposição das leis supracitadas, há uma motivação para o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão visando à otimização da rede de logística reversa, sendo importante que os tomadores de decisão trabalhem na redução do custo dessa rede para serem competitivos (ACHILLAS *et al.*, 2010).

Para isso, ferramentas de Pesquisa Operacional têm sido utilizadas, destacando-se, dentre elas, os modelos matemáticos, métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA), heurísticas e meta-heurísticas. Portanto, este trabalho visa propor um modelo matemático para o problema de localização de pontos de coleta de *e-waste*, com posterior aplicação em dois cenários-teste em um bairro do Município de Caruaru – PE, a fim de gerar desenvolvimento econômico e redução do impacto ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo propor um modelo matemático para o problema de localização de pontos de coleta de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (REEE), centrando-se na minimização do custo do sistema logístico reverso com relação ao transporte, instalação dos pontos, custo de oportunidade e distância entre os pontos e a demanda, com consequente redução no impacto ambiental.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingimento do objetivo geral apresentado, os seguintes objetivos específicos são buscados:

- Identificar na literatura os modelos de otimização utilizados no contexto do gerenciamento de *e-waste*;
- Identificar na literatura as heurísticas utilizadas como solução de problemas de gestão de *e-waste*;
- Aplicar o modelo matemático em dois cenários-teste a fim de contextualizá-lo, verificando sua funcionalidade.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (REEE) são considerados, na atualidade, um dos fluxos de resíduos de mais rápido crescimento no mundo com uma taxa

de crescimento estimada de 3% a 5% ao ano (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Segundo Lu *et al.* (2015), a constante inovação da tecnologia desses equipamentos, juntamente com sua substituição frequente, pode levar a grandes flutuações na geração de REEE e a impactos ambientais significativos. Isso está diretamente relacionado à obsolescência programada, que é uma prática em que as empresas, para evitar concorrência, “matam” os produtos usados, introduzindo uma nova versão do mesmo, o que torna os itens usados economicamente obsoletos (IIZUKA, 2007).

Em vista do aumento dos REEE, Sigrist *et al.* (2015) destacam o problema da falta de locais adequados para a disposição de resíduos eletroeletrônicos, os quais contêm substâncias tóxicas e perigosas ao meio ambiente e à saúde humana. Também ressaltam a falta de conscientização da maior parte da população acerca da necessidade de destinar adequadamente esses resíduos, mostrando que tudo isso é intensificado pelo aumento da globalização, crescimento da população e desenvolvimento dos setores tecnológicos.

Da mesma forma, o Brasil tem uma crescente taxa de geração de lixo eletrônico, sendo o segundo maior produtor de lixo eletrônico das Américas em 2016, com 1,5 milhões de toneladas (BALDÉ *et al.*, 2017). Porém, ainda existem poucos sistemas de gestão adequados em operação, com a maior parcela dos REEE indo para aterros sanitários ou entrando em cadeias informais (DE SOUZA *et al.*, 2016), mesmo apesar da existência da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que obriga o estabelecimento da logística reversa para o reaproveitamento desses tipos de resíduos. Ademais, no Estado de Pernambuco está em vigor a Lei Nº 15.084, de 6 de setembro de 2013, que dispõe sobre a obrigatoriedade de instalação de coletores de lixo eletrônico pelas empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte no Estado, e ainda dá outras providências (BRASIL, 2010; PERNAMBUCO, 2013). Porém, praticamente ainda não existem pontos de coleta e informações suficientes disponíveis para iniciar um processo de coleta e destinação adequada dos REEE, nem acordos firmados entre governos, empresas, cooperativas e consumidores relacionados a esse compromisso (SIGRIST *et al.*, 2015).

Dessa forma, tendo em vista as demandas impostas pela PNRS e pela Lei Nº 15.084 e ainda a vigente gestão inadequada de REEE em face ao crescente aumento desses resíduos, este trabalho propõe um modelo matemático para o problema de localização de pontos de coleta de REEE, com posterior aplicação-teste em um bairro da cidade de Caruaru – PE.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 4 capítulos. O primeiro capítulo apresenta os aspectos introdutórios do trabalho, objetivos, justificativa e relevância da pesquisa. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico do trabalho, o qual é dividido em duas partes. A primeira parte trata da gestão de REEE, definindo, para tal, o conceito de logística reversa, os resíduos elétricos e eletroeletrônicos propriamente ditos e explicitando alguns aspectos de sua gestão no âmbito nacional. A segunda parte aborda o uso da Pesquisa Operacional na gestão de *e-waste*. Também há uma ênfase no problema específico de localização de pontos de coleta. Este capítulo também traz em seu corpo uma breve revisão da literatura de trabalhos realizados neste campo de estudo. No capítulo 3 o modelo matemático proposto é apresentado e explicado e também este capítulo mostra uma aplicação do mesmo em duas situações-teste. O capítulo 4 contém as discussões dos resultados e considerações finais do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A GESTÃO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETROELETRÔNICOS (REEE)

A gestão de resíduos sólidos, de maneira geral, está intimamente ligada à logística reversa. Assim, esta seção inicialmente conceitua a logística reversa e depois trata especificamente dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos e alguns aspectos de sua gestão.

2.1.1 A Logística Reversa

A logística reversa pode ser definida como um instrumento de desenvolvimento social e econômico composto por um conjunto de ações e mecanismos destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitá-los em seu ciclo produtivo ou em outros ciclos, ou prover outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Vários autores propõem o sistema de logística reversa com quatro etapas principais: entrada, coleta, classificação e descarte. A primeira etapa é a entrada no sistema de logística reversa ou o reconhecimento de um retorno de produto. A segunda etapa envolve o agrupamento preliminar dos produtos coletados com base nas operações subsequentes, por exemplo, o processo de remanufatura ou reciclagem. A classificação detalhada (a terceira etapa) decide o destino de cada item retornado. Nesse momento, a empresa pode decidir o que fazer com o produto, estando este sujeito à inspeção, testes ou outras manipulações (LAMBERT *et al.*, 2011). Os produtos podem ser classificados em três grupos, segundo Prajapati *et al.* (2018):

- Produtos convertidos em produtos acabados: incluem produtos que podem ser convertidos em produto final com pequenas correções.
- Produtos convertidos em matéria-prima: inclui produtos que exigem grandes correções. Portanto, é melhor converter em matéria-prima para uso posterior na indústria.
- Produtos inconversíveis: não servem para a indústria e são rejeitados.

Por fim, a destinação do produto é realizada na última etapa, conforme mostra Lambert *et al.* (2011).

No Brasil, a PNRS assegura que a implementação e operacionalização do sistema de logística reversa são de responsabilidade dos fabricantes, importadores, distribuidores e

comerciantes. Algumas das medidas de sua responsabilidade são, por exemplo, a implantação de procedimentos de compra de produtos ou embalagens usados e a disponibilização de postos de entrega de resíduos reutilizáveis e recicláveis. Aos consumidores cabe a devolução dos produtos após o uso, e ao poder público, cabe a realização da coleta dos resíduos (BRASIL, 2010).

Em se tratando de REEE, especificamente, os quais são enfatizados neste trabalho, destaca-se que sua logística reversa possui diferenças com relação aos resíduos comuns. A diversidade de materiais encontrados nestes resíduos dificulta seu tratamento em conjunto com os demais tipos de resíduos (DA SILVA *et al.*, 2013; ONGONDO *et al.*, 2011). Sua reciclagem difere da reciclagem comum de duas maneiras significativas. Primeiro, o lixo eletrônico é composto de vários materiais, alguns dos quais são considerados perigosos. Segundo, os recicláveis comuns geralmente são feitos de materiais de baixo valor, limitando a capacidade de separar os componentes limpos de forma econômica. Por outro lado, os resíduos eletrônicos possuem quantidades de metais preciosos e não preciosos, além de componentes facilmente reutilizáveis, o que pode tornar viável e até lucrativo coletar e processar resíduos eletrônicos que podem ser obtidos de fontes dispersas em determinado local (NAGURNEY & TOYASAKI, 2005; SODHI & REIMER, 2001).

Várias são as questões envolvidas em um sistema de logística reversa. Segundo Rachih *et al.* (2018), os problemas de logística reversa podem ser classificados em sete áreas:

- Problema de roteamento de veículos;
- Desenho da rede logística;
- Planejamento da produção;
- Montagem e desmontagem;
- Gerenciamento de devoluções;
- Gerenciamento de estoques;
- Localização e alocação.

A seguir são mostradas as definições básicas de cada uma das referidas áreas da logística reversa.

2.1.1.1 O Problema de Roteamento de Veículos

O problema de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem – VRP*) é um dos problemas mais estudados na literatura de logística. Seu objetivo é projetar as rotas ideais para uma frota de veículos que fazem entregas ou coletas entre depósitos e um número de clientes, com o objetivo de minimizar o custo ou algum outro objetivo fixo sob uma série de restrições,

como por exemplo, a capacidade dos veículos (MAR-ORTIZ *et al.*, 2013; RACHIH *et al.*, 2018).

Dois dos principais pressupostos em que se baseia o modelo clássico do VRP são o uso de uma frota homogênea de veículos e o fato de que a demanda em cada nó é menor do que a capacidade dos veículos utilizados. No entanto, no contexto da coleta de REEE, ambas as suposições devem ser flexibilizadas dada a maneira como esses sistemas funcionam. Assim, existem diferentes variantes do VRP, que podem ser caracterizadas pelo tipo de frota, número de depósitos, tipo de operações envolvidas, entre outras variações. Por exemplo, pode ser considerado o uso de uma frota heterogênea de veículos, pode haver um acordo de um intervalo de tempo para que os veículos “visitem” os clientes, os clientes com alta demanda podem ser divididos para se adequar à capacidade do veículo e ainda o mesmo veículo pode ser alocado para mais de uma rota (MAR-ORTIZ *et al.*, 2011; MAR-ORTIZ *et al.*, 2013).

2.1.1.2 O Problema do Desenho da Rede Logística

É crescente na literatura a abordagem do problema do desenho de redes de suprimentos integrando a logística reversa. Quando as empresas participam da recuperação de produtos, elas precisam estabelecer novas infraestruturas logísticas para lidar com os fluxos de produtos usados e recuperados. Este é um problema de natureza complexa, sendo necessárias técnicas avançadas de otimização para se obter uma solução (RACHIH *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2017).

No problema de desenho da rede logística reversa são geralmente abordadas as decisões de localização para os centros de coleta e para as instalações de remanufatura dos produtos, a determinação das capacidades dessas instalações e a seleção de meios de transporte para garantir a satisfação dos clientes ao menor custo (RACHIH *et al.*, 2018; SHI *et al.*, 2017).

2.1.1.3 O Problema do Planejamento da Produção

O planejamento da produção refere-se à programação mensal dos níveis de produção de um produto ao longo de um horizonte de planejamento de um ano. Envolve a decisão de como produzir um determinado produto. Isso inclui decidir qual produto produzir, quando produzi-lo, quais recursos são necessários para produzi-lo e programar esses recursos para produção. Também envolve a decisão de onde obter as matérias-primas, suas quantidades necessárias, quando os recursos devem ser disponibilizados para a produção e em que sequência executar as atividades. O principal objetivo do planejamento da produção é maximizar os lucros e minimizar os custos, garantindo a satisfação do cliente. Também visa evitar falhas de

produção e garantir a melhor execução das operações. Com a integração de um fluxo reverso, esse planejamento se torna mais complexo (RACHIH *et al.*, 2018).

2.1.1.4 O Problema da Montagem e Desmontagem

O processo de montagem dos produtos é uma das atividades de manufatura mais demoradas e caras. Esse processo tem sido estudado há décadas se comparado ao processo de desmontagem, que é menos estruturado e mais instável, de modo que ele precisa ser gerenciado para evitar ineficiência, levando a um alto custo. Este é um processo muito importante, dado que cada um dos materiais que constituem um *e-waste* são extraídos de maneira diferente, e ao fazer isso de maneira correta, são gerados benefícios tanto econômicos como ecossistêmicos (ABDI, 2013; DIAS *et al.*, 2018; HABIBI *et al.*, 2017b; RACHIH *et al.*, 2018).

2.1.1.5 O Problema do Gerenciamento de Devoluções

O gerenciamento de devoluções é o processo de gerenciamento da cadeia de suprimentos pelo qual as atividades associadas a devoluções e logística reversa são gerenciadas dentro da empresa e entre os principais membros da cadeia de suprimento (ROGERS *et al.*, 2002). O sistema de informação é o responsável pelo gerenciamento de devoluções, pela comunicação eficiente entre as diferentes partes envolvidas e por desempenhar um papel na identificação de um produto e na decisão de como lidar com ele (LAMBERT *et al.*, 2011).

Com a implementação de um processo eficaz de gerenciamento de retornos, as empresas podem obter sucesso a longo prazo, melhorando seu desempenho financeiro e seus relacionamentos com seus clientes (RACHIH *et al.*, 2018).

2.1.1.6 O Problema do Gerenciamento de Estoques

A gestão de estoques é o processo de supervisionar de maneira eficiente o fluxo constante de unidades dentro e fora de um estoque de mercadorias existente. Trata principalmente da especificação da forma e da porcentagem das mercadorias estocadas. O gerenciamento de estoques é necessário em diferentes locais dentro de uma instalação ou em vários locais de uma rede de suprimentos para proteger o curso regular e planejado da produção contra a perturbação aleatória de falta de materiais ou mercadorias (ABISOYE *et al.*, 2013).

2.1.1.7 O Problema de Localização e Alocação

O problema da localização/ alocação de pontos de coleta de resíduos é uma das áreas da logística reversa que tem como objetivo encontrar a melhor localização de uma ou mais instalações, dependendo de critérios como a distância ideal, a capacidade da instalação e o custo ideal, para alcançar o valor mais alto de utilidade. O problema consiste em localizar um conjunto de novas instalações, de modo que o custo de transporte das instalações para os clientes seja minimizado e um número ideal de instalações seja colocado em uma área de interesse para satisfazer a demanda do cliente (AZARMAND & NEISHABOURI, 2009; RACHIH *et al.*, 2018).

2.1.2 Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (REEE)

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI (2013), os Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos (EEE) são divididos em quatro categorias amplas:

- Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;
- Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;
- Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;
- Linha Verde: computadores *desktop* e *laptops*, acessórios de informática, *tablets* e telefones celulares.

Cabe aqui destacar que esses equipamentos citados não esgotam a lista de EEE existentes. Ao fim de sua vida útil, eles são considerados resíduos, chamados comumente de REEE (ABDI, 2013), ou *e-waste*. Os REEE são um dos mais importantes fluxos de resíduos com alto potencial de reciclagem. Eles possuem mais de 1000 substâncias diferentes, muitas das quais são tóxicas, como cádmio, chumbo, mercúrio, selênio, entre outros. No Quadro 1 estão descritos os efeitos negativos pesquisados e citados por Puckett & Smith (2002) de algumas substâncias presentes em *e-waste*. Se reciclados adequadamente, eles poderiam levar a significativos benefícios econômicos e ambientais (DIAS *et al.*, 2018; PUCKETT & SMITH, 2002; NOWAKOWSKI, 2017).

A extração de cada um dos materiais contidos nos REEE exige um procedimento diferenciado. Assim, sua separação para processamento e reciclagem tem maiores custos,

complexidade e impacto do que aqueles exemplos mais conhecidos de recolhimento e tratamento de resíduos, como é o caso das latas de alumínio e garrafas de vidro (ABDI, 2013).

Quadro 1 - Alguns elementos presentes em REEE e seus efeitos negativos

Elemento	Principais efeitos negativos
Chumbo	Causa danos ao sistema nervoso central e periférico, ao sistema sanguíneo e aos sistemas renal e reprodutivo em humanos. Tem efeitos negativos no desenvolvimento do cérebro das crianças e também tem altos efeitos agudos e crônicos sobre plantas, animais e micro-organismos.
Cádmio	Os compostos de cádmio são tóxicos, com um possível risco de efeitos irreversíveis na saúde humana e se acumulam no corpo, particularmente nos rins.
Mercúrio	Pode causar danos a vários órgãos, incluindo o cérebro e os rins. Também causa danos ao feto. Quando se espalha na água, acumula-se facilmente nos organismos vivos e concentra-se através da cadeia alimentar, particularmente através dos peixes.
Bário	A exposição em curto prazo ao bário causa edema cerebral, fraqueza muscular, dano ao coração, fígado e baço.
Berílio	A exposição ao berílio pode causar câncer de pulmão. Os trabalhadores que estão constantemente expostos a ele, mesmo em pequenas quantidades, podem desenvolver a Doença de Berílio Crônico (berilicose), uma doença que afeta principalmente os pulmões. A exposição ao berílio também causa uma doença de pele que é caracterizada por má cicatrização de feridas e solavancos semelhantes a verrugas.

Fonte: O Autor (2019)

Nota: Baseado em Puckett & Smith (2002)

Um dos principais processos críticos a ser projetado para evitar os impactos ambientais e danos causados por uma gestão incorreta dos *e-waste* são os serviços de coleta. Por isso, a maioria das legislações e diretrizes sobre o gerenciamento de *e-waste* foca em metas de coleta (ELIA *et al.*, 2017). Wakolbinger *et al.* (2014), em seu estudo, mostram que baixas taxas de coleta de lixo eletrônico levam a lucros baixos para as partes interessadas e dificultam o estabelecimento de operações de reciclagem sustentáveis. Ademais, Dutra *et al.* (2018) mostra

que aumentando-se o alcance da coleta seletiva, a quantidade de resíduos sólidos recicláveis obtém um crescimento de 233%. Contudo, é vital que a coleta dos resíduos seja eficiente (NOWAKOWSKI, 2017) para que seus benefícios sejam totalmente aproveitados.

Existem dois métodos principais usados para coletar REEE: o método estacionário e o móvel, cada um com variantes diferentes. A coleta estacionária de REEE se dá principalmente em centros de coleta municipais ou lojas de EEE. No sistema móvel, os materiais podem ser coletados diretamente de residências ou empresas. O método móvel pode ser fornecido por meio de um cronograma de coleta local, como uma coleta seletiva (NOWAKOWSKI, 2017; NOWAKOWSKI *et al.*, 2017).

A coleta e o transporte dos resíduos são divididos em diferentes tarefas e etapas. Uma delas é o planejamento da localização de centros de coleta e instalações de tratamento com relação às distâncias ideais de seus usuários (NOWAKOWSKI & MRÓWCZYŃSKA, 2017). Essa localização também deve acontecer de forma a proporcionar a redução dos custos operacionais, os quais, segundo Nowakowski *et al.* (2017), podem ser otimizados através da minimização das rotas dos veículos de coleta, através da seleção do tipo e do número apropriado de veículos e através da maximização da utilização do compartimento de carga do veículo.

2.1.3 A gestão de REEE no Brasil

Segundo o relatório *Global e-Waste Monitor 2017* elaborado pela Universidade das Nações Unidas (UNU), União Internacional de Telecomunicações (ITU) e pela Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), foram gerados 44,7 milhões de toneladas de REEE em todo o mundo no ano de 2016, sendo somente 20% documentado para ser coletado e reciclado. Estima-se que no ano de 2021 essa quantidade deverá aumentar para 52,2 milhões de toneladas. O estudo ainda mostra o Brasil como o segundo maior produtor de lixo eletrônico das Américas em 2016, com 1,5 milhões de toneladas, perdendo apenas para os Estados Unidos da América (BALDÉ *et al.*, 2017).

Apesar desse cenário, no Brasil está em vigor a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que provê aos geradores dos resíduos nos domicílios a responsabilidade de disponibilizá-los adequadamente para a coleta e de efetuar sua devolução. A lei também provê que cada estado do país elabore um plano para gestão dos resíduos e, a nível municipal, responsabiliza o poder público na realização da coleta dos resíduos, na definição dos procedimentos para o acondicionamento adequado e na destinação adequada dos mesmos (BRASIL, 2010). As resoluções do governo local são essenciais porque os municípios

possuem essa responsabilidade pelo gerenciamento de resíduos sólidos municipais e porque os sistemas de logística reversa devem estar alinhados com os Planos de Gerenciamento de Resíduos Municipais. Além do mais, as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) indicam que a implementação das estratégias de manejo de resíduos da PNRS deve começar primeiro com as maiores cidades, com expansão progressiva para as menores (DE SOUZA *et al.*, 2016).

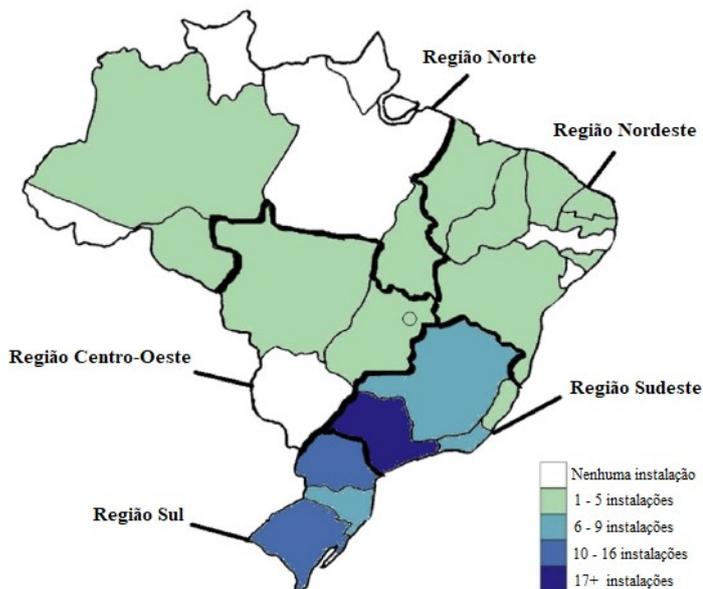
No país ainda existem duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que regulamentam a gestão de equipamentos eletroeletrônicos pós-consumo. A primeira norma é a ABNT NBR 15.833:2010 que trata da manufatura reversa de aparelhos de refrigeração, estabelecendo os procedimentos para transportar, armazenar e desmontar com reutilização e recuperação dos materiais recicláveis. A segunda é a ABNT NBR 16.156:2013 que trata dos requisitos para a atividade de manufatura reversa dos REEE. Ela determina requisitos para proteção ao meio ambiente e controle dos riscos à segurança e saúde nas atividades de manufatura reversa de resíduos eletroeletrônicos (XAVIER *et al.*, 2014). No entanto, apesar de tudo, ainda existem poucos sistemas de gestão adequados em operação para tratar os REEE, os quais são um problema ambiental devido à presença de substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (DE SOUZA *et al.*, 2016; DIAS *et al.*, 2018; SIGRIST *et al.*, 2015; WALTHER *et al.*, 2010). Guarnieri *et al.* (2016) ainda relatam que existem poucos e insuficientes programas de educação ambiental e que não há infraestrutura suficiente para que o cidadão devolva os resíduos adequadamente.

No ano de 2012 foi publicada uma proposta de Plano Nacional de Resíduos que previa a eliminação total dos lixões até 2014, bem como a redução progressiva dos resíduos recicláveis dispostos em aterros sanitários. No entanto, devido a algumas dificuldades encontradas pelos municípios no cumprimento das metas propostas, o Senado Federal aprovou em 2017 uma emenda que estabelece prazos para essa eliminação que variam entre 2018 e 2021 de acordo com o tamanho da população do município. As principais dificuldades estão relacionadas a um planejamento inadequado no manejo de resíduos sólidos para atender ao PNRS, o que muitas vezes leva a um maior custo com relação a um descarte correto de resíduos (DUTRA *et al.*, 2018).

Ainda, o governo federal e os governos locais não têm controle sobre o número de empresas ativas de reciclagem de REEE no país, apesar da recente implementação das políticas nacionais de gestão de resíduos. Essa falta de informação constitui uma das barreiras na aplicação da legislação (DIAS *et al.*, 2018). Ainda assim, Dias *et al.* (2018) encontrou em seu estudo um total de 134 recicladores no Brasil, sendo São Paulo o estado que possui o

maior número (45,5% dos recicladores). O estudo ainda mostra a região sudeste com 58% das instalações, seguida pela região sul (26%) e as regiões nordeste e norte possuem juntas 14 instalações (10,5%). A distribuição dos recicladores é mostrada no Mapa 1.

Mapa 1 - Distribuição dos Recicladores de REEE no Brasil



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2018)

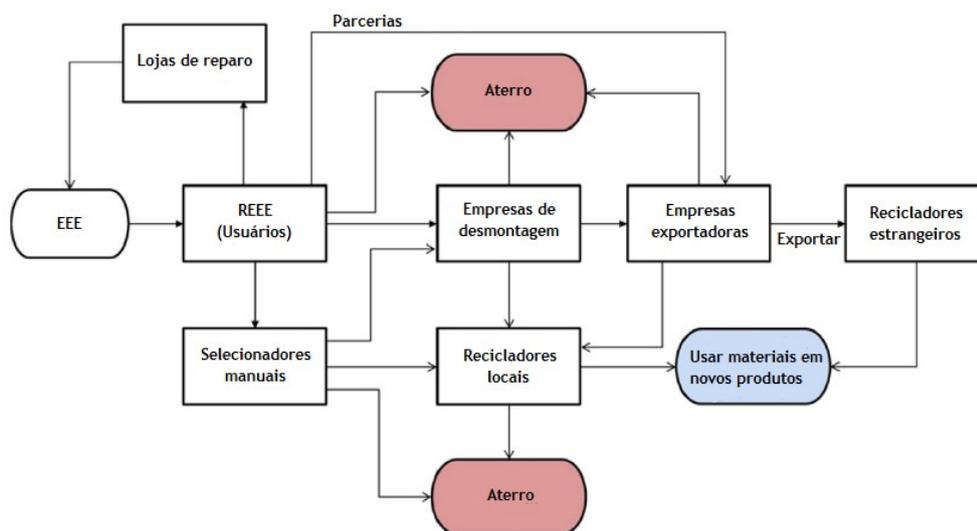
O supracitado estudo ainda mostra que 43,2% de *e-waste* que chegam aos recicladores são provenientes de centros de coleta. As parceiras com prefeituras/governos municipais são da mesma proporção. Outras formas em que os recicladores recebem *e-waste* também são destacadas, tais como: parcerias dos recicladores com as empresas (81,8%) e envio direto dos resíduos por parte do consumidor (63,6%). Portanto, ainda há uma significativa lacuna com relação à gestão de REEE provenientes de centros de coleta.

Isto posto, observa-se que, no Brasil, os REEE não seguem apenas um único caminho para chegar ao seu destino. Seus possíveis caminhos são mostrados no Fluxograma 1.

Os usuários (famílias, empresas, escritórios, universidades, lojas, etc) são os responsáveis por transformar EEE em REEE. Se descartados juntamente com resíduos comuns, os REEE podem ser enviados para aterros sanitários ou coletados manualmente por selecionadores, que selecionam materiais que agregam valor e podem ser vendidos. Se descartados corretamente, os REEE devem ir para os recicladores locais ou para as empresas de desmontagem. O papel destas últimas é desmontar o equipamento e classificar os diferentes materiais. Em seguida, enviam cada material triado para uma recicladora adequada

(por exemplo, sucata de polímeros para recicladores de polímeros, alumínio para recicladores de alumínio). Os recicladores locais recebem os materiais separados e realizam os processos de reciclagem específicos. Alguns recicladores locais também atuam como empresas de desmontagem. Tanto os recicladores locais quanto as empresas de desmontagem não separam materiais de componentes complexos. Estes são encaminhados para as empresas exportadoras. O papel das empresas exportadoras é reunir, moer (ou triturar) e transportar todos os componentes complexos para recicladores estrangeiros. Alguns componentes, como discos rígidos, não são triturados. Além disso, várias das empresas exportadoras são também uma empresa de desmontagem. Assim, eles recebem REEE dos usuários e de outras empresas de desmontagem (DIAS *et al.*, 2018).

Fluxograma 1 - Fluxograma esquemático demonstrando as rotas de REEE no Brasil



Fonte: Adaptado de Dias et al. (2018)

2.1.3.1 A gestão de REEE no Estado de Pernambuco

No Estado de Pernambuco está em vigor a Lei N° 15.084, de 6 de setembro de 2013, que obriga a instalação de coletores de lixo eletrônico por parte das empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte. Essas empresas devem ainda providenciar o envio do material recolhido aos pontos de coleta disponibilizados pelo poder público, pelos fabricantes ou por outros integrantes da sociedade civil organizada. Se descumprirem isso, ficam sujeitas à advertência ou multa quando autuadas uma segunda vez (PERNAMBUCO, 2013).

Todavia, grande parte do *e-waste* ainda é destinada de maneira incorreta, pois, com o descarte sendo feito juntamente com o lixo comum, os resíduos vão para aterros sanitários ou cadeias informais (DE SOUZA *et al.*, 2016; DIAS *et al.*, 2018). Sendo assim, existe a necessidade da instalação de mais pontos de coleta e de que a coleta aconteça de maneira eficiente (NOWAKOWSKI, 2017; SIGRIST *et al.*, 2015). E essa eficiência não depende apenas da indústria, dos distribuidores e do governo, mas também da educação e da cooperação das pessoas (DE OLIVEIRA, 2012). Apesar de haver uma intenção positiva da população brasileira com relação à reciclagem de lixo eletrônico, apenas uma minoria adota práticas de reciclagem adequadas (ECHEGARAY & HANSSTEIN, 2017), já que os consumidores têm o hábito de doar ou vender produtos eletrônicos ao mercado secundário em vez de devolvê-los ao fabricante. Essa situação também é fomentada, além da falta de conscientização pública e de educação ambiental, pela ausência de pontos de coleta de lixo eletrônico (GUARNIERI *et al.*, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), que tem como proposta a operacionalização da Logística Reversa de suas empresas associadas, em todo o estado de Pernambuco existem apenas 53 pontos de coleta de pilhas e baterias (distribuídos em 9 cidades) da Green Eletron, entidade criada pela ABINEE. Em se tratando de pontos de coleta para eletrônicos em geral, não há pontos da Green Eletron no estado (GMCONS, 2019; GREEN ELETRON, 2019).

Em uma das cidades mais importantes de Pernambuco – Caruaru – existem apenas três pontos da Green Eletron para coleta exclusiva de pilhas e baterias (GMCONS, 2019). De acordo com a prefeitura, na cidade não existe pontos de coleta de REEE em geral. A recolha só é efetuada através do contato direto do usuário com a prefeitura, solicitando a coleta. Porém, devido à falta de conscientização de grande parte da população acerca da necessidade da destinação adequada dos resíduos (SIGRIST *et al.*, 2015), essa pode não ser a melhor escolha. Por outro lado, a presença de pontos de coleta próximos à demanda estimularia um comportamento mais tendente à disposição correta dos materiais (HOSSEINI *et al.*, 2019).

2.2 O USO DA PESQUISA OPERACIONAL NO SUPORTE À GESTÃO DE REEE

Muitas ferramentas de Pesquisa Operacional têm sido utilizadas como suporte à gestão de REEE, como por exemplo, os modelos matemáticos, heurísticas e meta-heurísticas. Um levantamento sobre o uso de ferramentas de Pesquisa Operacional no contexto de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos foi realizado por Silva *et al.* (2018). Os autores mostram algumas técnicas utilizadas nesse contexto, dentre elas: Programação Linear,

Programação Linear Inteira Mista, Programação Linear de Múltiplos Objetivos, Busca Tabu e Otimização de Colônia de Formigas. Eles destacam a frequência do uso de diversos modelos matemáticos de otimização resolvidos através do uso de heurísticas.

Para resolução dos modelos matemáticos, os métodos exatos de solução (os quais determinam a solução ótima para o problema) podem ser utilizados, como por exemplo, o método *Branch and Bound*. Porém, diversos autores, ao tratarem sob diferentes perspectivas acerca do problema de gerenciamento de REEE, classificam-no como um problema NP-*hard*, que é uma classe de problemas que, segundo Tasan & Gen (2012), torna os métodos exatos de solução altamente demorados à medida que as instâncias do problema aumentam de tamanho. Habibi *et al.* (2017a), por exemplo, trata da otimização de rotas dos veículos de coleta e dimensionamento dinâmico de lote da quantidade transportada, mostrando que o problema é NP-*hard*. Nowakowski *et al.* (2017) classificam da mesma forma o problema de otimização de rotas dos veículos de coleta, juntamente com a seleção de veículos para realizá-la. Nowakowski (2017) também aborda um problema NP-*hard* considerando o problema da capacidade de carregamento dos veículos e o problema de roteamento dos mesmos, e também Mar-Ortiz *et al.* (2013), que tratam o roteamento e programação de veículos para a coleta dos resíduos. Mar-Ortiz *et al.* (2011), que trata dos problemas de localização e roteirização de forma simultânea, também destacam a natureza a NP-*hard* dessas problemáticas. Assim, o uso de algoritmos exatos para resolução desse tipo de problema (NP-*hard*) se torna inviável devido ao alto custo computacional, demandando um tempo muito grande para encontrar uma solução ótima.

Desse modo, são utilizadas heurísticas, que são ferramentas que asseguram soluções relativamente boas em tempos computacionais aceitáveis, embora não garantam uma solução ótima (JUNQUEIRA & MORABITO, 2015). Algumas heurísticas são denominadas de meta-heurísticas, que são procedimentos capazes de escapar de ótimos locais, realizando uma busca robusta no espaço de solução do problema, de forma a produzir soluções de alta qualidade (GLOVER & KOCHENBERGER, 2003; VOß & WOODRUFF, 2006).

2.2.1 Métodos heurísticos de solução utilizados na gestão de REEE

Diversas heurísticas e meta-heurísticas podem ser encontradas na literatura para resolver problemas NP-*hard*, inclusive no contexto de logística reversa. Rachih *et al.* (2018) destacam os métodos comumente usados na literatura para as sete áreas da logística reversa, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Meta-heurísticas por áreas da Logística Reversa

Área da Logística Reversa	Métodos
Problema de roteamento dos veículos	Otimização por Colônia de Formigas (ACO), Busca Tabu (TS), <i>Variable Neighborhood Search</i> (VNS)
Desenho da rede	Algoritmos Genéticos (GA), <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO)
Localização e Alocação	Algoritmos Genéticos (GA), Busca Tabu (TS)
Planejamento de produção, montagem e desmontagem, gerenciamento de devoluções, gestão de estoque	Algoritmos Genéticos (GA), <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO), Busca Tabu (TS), Recozimento Simulado (SA), <i>Variable Neighborhood Search</i> (VNS)

Fonte: Adaptado de Rachih et al. (2018)

Além dos métodos que constam no Quadro 2, outros são usados, como por exemplo o trabalho de Mar-Ortiz *et al.* (2013), que apresenta um algoritmo baseado em GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) para resolver um problema de roteamento e programação de veículos para a coleta dos resíduos. Ademais, Nowakowski (2017) aplica um algoritmo de busca local e gulosa, além do Busca Tabu (*Tabu Search*). Uma combinação de heurísticas também pode ser explorada, como é o caso de Junqueira & Morabito (2015). A seguir, os referidos métodos serão melhormente especificados.

2.2.1.1 Busca Tabu (*Tabu Search* – TS)

Busca Tabu é um método que permite o escape dos ótimos locais, já que, quando um ótimo local é encontrado, o TS possibilita movimentos não aprimorados, que pioram a solução, na esperança de encontrar uma solução melhorada nas soluções vizinhas. Soluções vizinhas são aquelas obtidas a partir de uma transformação na solução atual. E para evitar movimentos cíclicos, uma lista tabu é usada para armazenar informações sobre movimentos recentes (RACHIH *et al.*, 2018; SADRNIA *et al.*, 2014; SILVER, 2004).

Rachih *et al.* (2018) mostram como vantagem da TS a busca do espaço da solução que é facilitada pelas funções de memória (lista tabu) que preservam a solução em cada iteração. Os autores ainda destacam que a TS é capaz de lidar com problemas de planejamento de transporte e roteamento de longo alcance, incluindo decisões complexas de transporte.

2.2.1.2 Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* – GAs)

Os GAs são algoritmos estocásticos e iterativos baseados na genética das populações. Nesta abordagem, as diferentes versões de solução são chamadas de indivíduos. O Algoritmo Genético clássico possui três etapas, começando com a seleção de indivíduos, a qual é feita

com base no valor de uma função *fitness*, que avalia a qualidade do indivíduo, onde os indivíduos com melhor *fitness* sobrevivem, enquanto aqueles com pior *fitness* morrem. Após a seleção dos melhores indivíduos, acontece um processo chamado *crossover*, em que um par de indivíduos são selecionados aleatoriamente e recombinados, gerando assim soluções filhas. O terceiro passo consiste na mutação do indivíduo, que faz pequenas alterações aleatórias na solução. Após o *crossover* e a mutação, cada filho é avaliado em termos da função *fitness* mencionada anteriormente (NOWAKOWSKI *et al.*, 2017; RACHIH *et al.*, 2018; TAZAN & GEN, 2012).

O GA possui muitas características que o distinguem das técnicas tradicionais de otimização. Por exemplo, os métodos tradicionais não podem avaliar muitas soluções ao mesmo tempo, o que é possível em GAs, fato este que contribui para a convergência a um ótimo global (embora não haja garantia de obtê-lo). Além disso, assim como TS, são muito úteis para lidar com problemas complexos no *design* da cadeia de suprimentos e na seleção de locais das instalações, encontrando os melhores locais para recursos e os melhores usos do espaço físico. GA e TS ainda podem ser usados para resolver problemas de localização para instalações de coleta e remanufatura de produtos devolvidos. Também têm uma boa capacidade de realizar uma pesquisa global e explorar o espaço de pesquisa e são adequados para vários tipos de problemas de otimização, como por exemplo, determinar o número de veículos de uma cadeia de suprimentos e como alocá-los para clientes ou regiões. São usados para encontrar a melhor abordagem para a coleta, reparo, revenda e disposição de produtos devolvidos, pois são algoritmos rápidos de implementar e parecem funcionar de maneira aceitável na prática. Além disso, eles podem ser combinados com outros métodos para mitigar algumas de suas limitações (RACHIH *et al.*, 2018).

Os métodos TS, porém, geralmente implementam um movimento em cada iteração, enquanto os Algoritmos Genéticos podem gerar vários novos movimentos (indivíduos) em cada iteração (geração) (CRAINIC & TOULOUSE, 2003).

2.2.1.3 Otimização de Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO)

A Otimização de Colônia de Formigas é uma técnica baseada no comportamento das formigas à procura de uma fonte de alimento. As formigas deixam o ninho e se movem aleatoriamente para encontrar comida, liberando uma substância chamada feromônio, que mostra o caminho traçado pela formiga. Quando encontram um rastro de feromônio feito por outras formigas, decidem se irão segui-lo ou não. Se elas decidirem segui-lo, liberarão seus próprios feromônios pela trilha. Assim, a qualidade do feromônio em um caminho torna mais

provável qual caminho deve ser selecionado pela formiga em relação a outros caminhos, já que a quantidade de feromônio no caminho seria gradualmente destacada entre os outros. Dessa forma, o ACO é uma simulação da colônia de formigas para encontrar o caminho mais curto. No algoritmo ACO, o ninho é representado pela condição inicial e a comida é representada pela condição de término. As formigas se movem em uma rede onde os feromônios são depositados. Elas escolhem um nó na rede para ir às próximas etapas com base em uma decisão probabilística de que a quantidade de feromônio depositada sobre o nó pode afetar a decisão (SADRNIA *et al.*, 2014).

Segundo Rachih *et al.* (2018), a principal vantagem do algoritmo ACO é sua capacidade de produzir uma boa solução sub-ótima em um tempo muito curto. Os autores também destacam o potencial para resolver problemas de roteamento com múltiplos objetivos.

2.2.1.4 Recozimento Simulado (*Simulated Annealing* – SA)

O Recozimento Simulado é um método probabilístico inspirado no processo de recozimento na metalurgia, que envolve o aquecimento dos metais e seu resfriamento controlado a fim de maximizar o tamanho de seus cristais e minimizar seus defeitos. Essa noção de resfriamento lento está associada, no algoritmo do SA, à diminuição lenta na probabilidade de aceitar soluções piores conforme se explora o espaço de solução (RACHIH *et al.*, 2018; SADRNIA *et al.*, 2014).

O SA começa com uma alta temperatura (parâmetro T). Depois de gerar uma solução inicial, ela tenta mover a solução atual para uma das soluções vizinhas. As alterações nos valores da função objetivo (ΔE) são calculadas. Se a nova solução resultar em um melhor valor da função objetivo, ela é aceita. No entanto, se a nova solução rende um pior valor, ela ainda pode ser aceita de acordo com a função de probabilidade $P(\Delta E) = \exp(-\Delta E/k_B T)$, onde k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura atual. Esta verificação é realizada selecionando primeiro um número aleatório no intervalo $(0,1)$. Se esse número for menor ou igual ao valor da probabilidade, a nova solução é aceita; caso contrário, é rejeitada. Ao aceitar soluções piores, o método pode evitar que a solução fique presa em ótimos locais. O SA repete este processo L vezes para alcançar o equilíbrio térmico, onde L é um parâmetro de controle. O parâmetro T é gradualmente diminuído por uma função de resfriamento até que a condição de parada seja atendida (WU *et al.*, 2008).

O SA é uma técnica robusta e geral, sendo bastante versátil, flexível e pode se aproximar da otimização global. É ainda capaz de lidar com modelos altamente não-lineares, dados caóticos e ruidosos e muitas restrições (RACHIH *et al.*, 2018).

Sadrnia *et al.* (2014) cita alguns trabalhos na área de logística reversa que utilizaram o Reconhecimento Simulado, fato este corroborado por Rachih *et al.* (2018), que mostra que esta metaheurística possui uma parcela considerável de uso nos trabalhos voltados a essa área.

2.2.1.5 GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*)

O GRASP é um método iterativo, onde cada iteração consiste em duas fases: a fase de construção de uma solução viável e a fase de busca local, que explora a vizinhança da solução construída a fim de encontrar um ótimo local. O resultado será a melhor solução encontrada ao longo de todas as iterações (CHAVES *et al.*, 2007; RACHIH *et al.*, 2018).

Na fase de construção, uma solução é construída de modo iterativo, elemento por elemento. A cada iteração dessa fase, os próximos elementos candidatos a fazerem parte da solução são colocados em uma lista, obedecendo a um certo critério de ordenação e, ainda, um elemento aleatório é escolhido dentre os melhores contidos nessa lista de candidatos. Após isso, uma função *fitness* é avaliada, a qual estima o benefício da seleção de cada um dos elementos. Por fim, a fase de busca local é executada, objetivando melhorar a solução construída (CHAVES *et al.*, 2007; RACHIH *et al.*, 2018). Essa técnica de escolha permite que diferentes soluções sejam criadas em cada iteração do GRASP, diversificando o espaço de busca. Cabe destacar também que a eficiência da busca local depende da qualidade da solução construída, fazendo com que a fase de construção tenha um papel fundamental para acelerar o processo de busca (CHAVES *et al.*, 2007).

Embora o GRASP não apareça na lista de métodos mostrados no Quadro 2, este é um método que possui certa parcela de utilização na solução de problemas de logística reversa, conforme mostrado no trabalho de Rachih *et al.* (2018).

2.2.1.6 Método de Pesquisa em Vizinha Variável (*Variable Neighborhood Search – VNS*)

VNS é uma meta-heurística que consiste na exploração do espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de vizinhanças. Ao contrário de outros métodos, o VNS explora vizinhanças gradativamente mais distantes da solução atual e a busca é focalizada em torno da nova solução se e somente se uma melhora for realizada. O método também inclui um procedimento de busca local a ser executado sobre a solução corrente. De modo mais específico, a heurística parte de uma solução inicial qualquer e, a cada iteração, seleciona de modo aleatório um vizinho dentro da vizinhança da solução corrente, o qual é submetido a um processo de busca local. Se a solução encontrada for melhor que a solução corrente, a busca continua da primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, a busca prossegue a partir da

próxima vizinhança. O método é finalizado quando a condição de parada for atingida, ou quando o tempo máximo de processamento for atingido ou ainda quando houver um número máximo de iterações consecutivas sem melhoramento (CHAVES *et al.*, 2007).

O VNS é conhecido por sua capacidade de resolver o Problema do Caixeiro Viajante, bem como problemas de localização e roteamento com janelas de tempo e o roteamento de veículos com uma frota heterogênea (RACHIH *et al.*, 2018).

2.2.1.7 Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO)

O PSO é uma heurística inspirada no comportamento de um enxame (grupo) de animais à procura por comida dentro de alguma área e eles não sabem a localização dos alimentos. Esse comportamento enfatiza a capacidade de um grupo de indivíduos em movimento para manter uma distância ideal entre eles e seguir um movimento global com os movimentos locais de seus vizinhos (RACHIH *et al.*, 2018; SADRNIA *et al.*, 2014).

O PSO é baseado em um conjunto de indivíduos chamados de partículas, originalmente organizados de forma aleatória e homogênea. Um número de partículas (que são as soluções potenciais) é colocado aleatoriamente dentro do hiperespaço de pesquisa. Cada partícula pode memorizar a melhor solução visitada, bem como se comunicar com partículas vizinhas. A partir dessa informação, a partícula seguirá, por um lado, uma tendência determinada pelo desejo de retornar à sua solução ótima e, por outro lado, seguirá as soluções encontradas em sua vizinhança. A cada etapa, o PSO usa uma função *fitness* para avaliar e atualizar as soluções, a fim de obter uma solução ideal (KOLIAS *et al.*, 2011; RACHIH *et al.*, 2018).

Kolias *et al.* (2011) destacam o PSO como um método de fácil implementação e, como ele retém um tipo de memória, é essencial para a convergência para uma solução ótima, cabendo destacar que não há garantia de um ponto ótimo. Além disso, no PSO, apenas a melhor partícula fornece informações aos outros, sendo uma abordagem adequada para o desenho da rede de logística reversa com múltiplos objetivos (RACHIH *et al.*, 2018).

2.2.2 Modelagem Matemática para Localização de Pontos de Coleta de Resíduos

Na literatura, é possível encontrar diversos problemas representados através de um modelo matemático, que é uma representação da realidade expressa em termos de símbolos e expressões matemáticas, onde o objetivo é escolher os valores das variáveis de decisão de forma a otimizar uma função objetivo sujeita a restrições especificadas (HILLIER & LIEBERMAN, 2010). Entre tais modelos, se encontram aqueles relacionados com a localização de pontos de coleta de resíduos.

A questão da localização de pontos de coleta de REEE é abordada, dentre outros autores, por Mar-Ortiz *et al.* (2011), que, primeiramente, elaboram um modelo matemático para localização das instalações de coleta e depois modelam o problema de roteamento dos veículos. Os autores mostram que o problema de localização das instalações está intimamente ligado com o problema de roteirização dos veículos, dado que os pontos de coleta devem ser dispostos de maneira a minimizar o custo de transporte, ao mesmo tempo em que suprem satisfatoriamente a demanda. Dada essa relação, Hosseini *et al.* (2019), por sua vez, constroem uma modelagem matemática considerando simultaneamente o problema de localização e roteirização.

Outras questões podem ser incorporadas à problemática relacionada aos pontos de coleta, tais como a desmontagem dos materiais para reciclagem, dimensionamento dinâmico de lote, seleção de veículos de frota heterogênea para recolha dos resíduos, restrições de capacidade da instalação, de capacidade do veículo, da duração da rota, etc. (HABIBI *et al.*, 2017a; HOSSEINI *et al.*, 2019; NOWAKOWSKI *et al.*, 2017). A problemática tratada por Aquino & Silva (2019), por exemplo, trata de uma modelagem matemática para localização de pontos de coleta de REEE, considerando, dentre outros aspectos, a roteirização dos veículos, capacidade de carga dos mesmos e capacidade das instalações.

Assim, as sete supracitadas questões ligadas à logística reversa abordadas por Rachih *et al.* (2018) estão relacionadas. É de suma importância, então, utilizar-se de um sistema eficaz de gerenciamento de informações, de forma a integrar adequadamente as áreas, dado que um sistema de gerenciamento de informações é um dos componentes essenciais para um sistema de logística reversa bem-sucedido, segundo Lambert *et al.* (2011).

Portanto, na modelagem matemática, ainda que o problema de localização possa ser trabalhado separadamente, por outro lado, ele também pode também integrar outros problemas relacionados à logística reversa.

Ballou (2006) mostra alguns métodos utilizados para auxiliar a tomada de decisão acerca da localização de múltiplas instalações (armazéns, fábricas, pontos centrais de serviço, etc.). Segundo o autor, os métodos matemáticos de localização podem ser caracterizados como exatos, de simulação e heurísticos.

2.2.2.1 Métodos Exatos de Localização

Os métodos exatos são aqueles que garantem uma solução matemática ótima para o problema de localização. Todavia, esses métodos podem resultar em um longo tempo de

processamento no computador quando aplicados a problemas de ordem prática (BALLOU, 2006).

Um exemplo dos métodos exatos de localização é a abordagem de Múltiplo Centro de Gravidade. Antes de tratar desse método especificamente, faz-se necessário abordar sobre o método do centro de gravidade para apenas uma instalação. Este é usado para encontrar uma localização que minimize os custos de transporte, onde todas as localizações possíveis possuem um “valor”, o qual é obtido por intermédio da soma de todos os custos de transporte com relação a essa localização. O custo de transporte TC é mostrado na Equação 2.1, onde V_i é o volume de demanda no ponto i , R_i é a taxa de transporte até o ponto i e d_i é a distância da instalação a ser localizada até o ponto i . Mediante a resolução de duas equações – Equações (2.2) e (2.3) – encontra-se as coordenadas da localização em um plano cartesiano, isto é, as coordenadas do centro de gravidade. E através das atualizações no cálculo de d_i (Equação 2.4), o processo segue iterativamente até que os valores das coordenadas praticamente não se alterem. Vale destacar que os valores iniciais das coordenadas são obtidos sem d_i (BALLOU, 2006; SLACK *et al.*, 2009).

$$\min TC = \sum_i V_i R_i d_i \quad (2.1)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_i V_i R_i X_i / d_i}{\sum_i V_i R_i / d_i} \quad (2.2)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_i V_i R_i Y_i / d_i}{\sum_i V_i R_i / d_i} \quad (2.3)$$

$$d_i = \sqrt{(X_i \pm \bar{X})^2 + (Y_i \pm \bar{Y})^2} \quad (2.4)$$

Na abordagem de Múltiplo Centro de Gravidade, é necessário atribuir localizações arbitrárias entre os pontos de origem e destino, formando assim um número de conglomerados de pontos igual ao número de instalações que se quer localizar. Assim, o método de centro de gravidade é usado para cada um dos conglomerados. Estes podem ser configurados mediante a concentração dos pontos mais próximos entre si. Depois de se encontrar as localizações de centro de gravidade, os pontos são realocados a estas localizações. Novas localizações de centro de gravidade são encontradas para os conglomerados revisados. Este processo avança até que não se encontre mudança nenhuma (BALLOU, 2006).

Ballou (2006) ainda fala da programação linear inteira como um dos métodos exatos para o problema de localização. A programação linear inteira mista, em que algumas variáveis devem assumir apenas valores inteiros (HILLIER & LIEBERMAN, 2010), pode ser utilizada para essa problemática através de variáveis que determinem se uma instalação será localizada em certo ponto ou não. Neste caso, ter-se-iam variáveis de natureza binária.

Modelos de programação inteira mista são utilizados para resolver problemas de localização denominados *p-mediana*, como mostram Adasme (2018), Herda (2017) e Mladenović *et al.* (2007). Ora, o problema da *p-mediana* e suas extensões têm sido usados para modelar uma variedade notável de problemas de localização no mundo real. A *p-mediana* aborda o problema de alocação de p instalações a uma população geograficamente distribuída em pontos de demanda Q , de forma que a distância média ou total da população em uma rede até sua instalação mais próxima seja minimizada (CARLING *et al.*, 2015; MLADENOVIĆ *et al.*, 2007).

Mladenović *et al.* (2007) formulam o problema da *p-mediana* da seguinte maneira. São definidos dois conjuntos de variáveis de decisão:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{se uma instalação é aberta em } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o cliente } i \text{ for atendido por uma instalação localizada em } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Segundo os autores, a função objetivo é definida como na Equação (2.5), sujeita às restrições contidas em (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9), onde d_{ij} refere-se às distâncias percorridas (ou custos incorridos) para satisfazer a demanda do usuário localizado em i a partir da instalação localizada em j .

$$\min \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (2.5)$$

Sujeito à:

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.6)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \quad (2.7)$$

$$\sum_j y_j = p \quad (2.8)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.9)$$

As Restrições (2.6) fazem com que a demanda de cada usuário seja atendida. As Restrições (2.7) impedem que qualquer usuário seja atendido por um lugar com uma instalação não aberta. O número total de instalações abertas é definido como p em (2.8) (MLADENOVIC *et al.*, 2007). A Restrição (2.9) trata da natureza binária das variáveis de decisão.

Como o problema da p -mediana é um problema da classe *NP-hard*, os métodos exatos de solução se tornam altamente demorados à medida que o problema aumenta de tamanho (CARLING *et al.*, 2015; KARIV & HAKIMI, 1979; TASAN & GEN, 2012). Assim, são necessárias heurísticas para resolver o problema em tempo hábil.

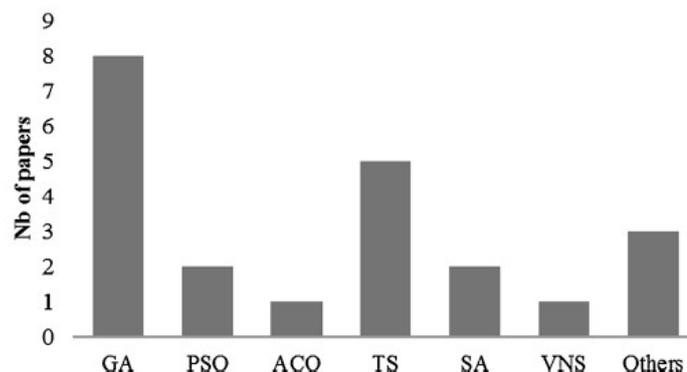
2.2.2.2 Métodos Heurísticos de Localização

As heurísticas são ferramentas que permitem que sejam alcançadas boas soluções em tempos computacionais menores, embora não garantam uma solução ótima (BALLOU, 2006; JUNQUEIRA & MORABITO, 2015).

Ballou (2006) mostra que é possível desenvolver um procedimento heurístico a partir do método do múltiplo centro de gravidade. Outras heurísticas também podem ser utilizadas, como mostrado na seção 2.2.4 desta dissertação.

O Gráfico 1 resume as meta-heurísticas mais utilizadas para resolver especificamente esse tipo de problema de logística reversa, onde a coluna indica o número de artigos que aplicaram os métodos que constam no eixo horizontal. Os Algoritmos Genéticos e Busca Tabu são os mais utilizados, conforme se pode observar também no Quadro 2.

Gráfico 1 - As meta-heurísticas mais usadas para resolver problemas de localização/ alocação



Fonte: Rachih *et al.* (2018)

2.2.2.3 Métodos de Simulação para Localização

Um modelo de simulação para localizar instalações refere-se a uma representação matemática de um sistema logístico através de demonstrações algébricas e lógicas manipuláveis em computador. Aqueles que entendem que uma descrição exata do problema é mais importante que a solução ótima, estes muitas vezes confiam em simulações como seu método preferido (BALLOU, 2006).

Por outro lado, as exigências maciças de dados e os longos tempos de processamento de computador podem ser um problema para esta metodologia. Além disso, um grande problema com os simuladores de localização é o fato de o usuário não poder saber quão perto as configurações escolhidas estão do ponto ótimo. Mesmo assim, as precisas descrições da situação real são as principais razões que fazem deles uma preferência entre os usuários (BALLOU, 2006).

3 MODELO MATEMÁTICO PARA LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE COLETA DE REEE EM CARUARU – PE

O modelo matemático proposto nesta dissertação busca definir a melhor localização para instalação de pontos onde os usuários poderão depositar REEE, de tal forma que essa localização permita a minimização do custo do sistema logístico reverso. Ele também integra a questão da roteirização dos veículos que realizarão a coleta. Os custos que serão minimizados constituem-se no custo de oportunidade, custo de transporte dos veículos que realizarão a coleta, custo de instalação dos pontos e custo da distância da demanda até chegar ao ponto de coleta.

O custo de oportunidade está associado aos custos incorridos ao se rejeitar uma oportunidade. Neste caso, esse custo está ligado ao fato de se a demanda não for satisfeita, isto é, se os resíduos não forem recolhidos. Assim, parte dos REEE pode não ser coletada, e se assim for, o impacto negativo causado pelos REEE permanece vigorando, impacto este quantificado aqui em forma monetária. A consideração deste custo é importante, pois, de outra forma, o impacto do não recolhimento não seria considerado adequadamente no modelo.

O custo de transporte dos veículos que realizarão a coleta possibilita a localização dos pontos de coleta de forma que a trajetória dos veículos ao percorrê-los seja menos custosa. O custo de instalação dos pontos de coleta é levado em conta, pois, de outra forma, uma solução razoável seria a de que os pontos devem ser instalados indefinidamente. Por fim, é importante que os pontos de coleta estejam próximos à demanda, para isto, o custo da distância dos nós de demanda até chegar ao ponto de coleta também é avaliado.

Sendo assim, o modelo é capaz de determinar a quantidade de pontos de coleta necessários, onde eles estarão localizados e a rota a ser percorrida pelos veículos de coleta, considerando que estes devem ter sua trajetória de forma menos custosa, ao mesmo tempo em que os pontos devem estar relativamente próximos à demanda. Para isso, os custos de instalação e os custos de não satisfação da demanda também são considerados.

O modelo matemático proposto ainda estima a quantidade de REEE a ser recolhida em cada ponto de coleta. Para isto, seria importante saber a quantidade de REEE depositada em cada ponto, mas isto é muito difícil de ser determinado, pois não se sabe em quais pontos a demanda depositará o lixo. Devido a esta incerteza, o modelo distribui a demanda total de resíduos entre os pontos de forma livre, isto é, sem nenhum rigor estatístico. De toda forma, isto é importante para obter um panorama geral da quantidade de resíduos que serão recolhidos em todos os pontos. Assim, cada visita do veículo a um ponto de coleta implica

uma quantidade recolhida de resíduos calculada pelo modelo, e ainda que esta quantidade não seja exata em cada ponto, tem-se com exatidão a quantidade recolhida de forma global. Para isto, porém, é considerado que toda a demanda deve depositar os resíduos nos pontos de coleta.

Esta estimativa é importante porque, através da suposição que é adotada pelo modelo de que os clientes em todos os nós de demanda devem depositar fielmente os resíduos nos pontos de coleta, o custo de oportunidade total pode ser calculado com base na diferença direta entre a demanda total e a quantidade recolhida estimada. Essa estimativa também é importante, pois a demanda em si, segundo Khosravi & Jokar (2017), é altamente dependente de onde as instalações serão localizadas. Assim sendo, embora não se saiba a demanda em cada nó individualmente, supõe-se que cada nó geralmente depositará os REEE nas proximidades dos respectivos pontos de coleta e estimar-se-á o quanto da demanda total foi satisfeita.

3.1 PROPOSIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A princípio, são mostrados os seguintes conjuntos utilizados no modelo, a saber:

D – conjunto dos nós de demanda, ou seja, os pontos principais onde há significativa quantidade de REEE;

I – conjunto dos pontos (localidades) potenciais para a instalação de um ponto de coleta;

K – conjunto dos veículos de coleta;

Q – conjunto que, além de conter os pontos do conjunto I , também contém 0 e n , que representam respectivamente o ponto da origem, de onde o veículo sairá, e o ponto de término da rota do veículo, isto é, a estação de tratamento de resíduos;

U – representa todas as combinações de pontos em uma dada sub-rota com $|U|$ pontos.

As variáveis de decisão são as seguintes:

r_i – quantidade estimada de REEE a ser recolhida (em kg) no ponto de coleta i ;

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo de coleta } k \text{ se desloca do ponto } i \text{ ao ponto } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O modelo também possui a variável auxiliar y_{ik} , obtida através da Equação (3.1), possuindo a seguinte natureza:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } k \text{ visita o ponto } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Ou seja, através da Equação (3.1) tem-se que: se um veículo parte do ponto i para qualquer outro ponto, este veículo esteve no ponto i .

Se pelo menos um veículo k visitar o ponto i , outra variável de decisão auxiliar, denotada por z_i , assumirá valor 1, indicando assim que no ponto i haverá um ponto de coleta. A variável z_i é obtida através da Equação (3.2). Por exemplo, suponha-se que dois veículos visitem o ponto i , isto é, suponha-se que o somatório presente na Equação (3.2) seja igual a dois; esta Equação tomará o valor mínimo entre um e dois (no caso, o valor um), pois esta variável objetiva indicar, pela sua binariedade, que o valor 1 corresponde a instalação de um ponto de coleta em i , se pelo menos um veículo visitar tal ponto. Caso nenhum veículo visite i (o somatório seria zero), z_i assumiria o valor zero, indicando que no ponto i não deve ser instalado nenhum ponto de coleta.

$$y_{ik} = \sum_{j \in I} x_{ijk} \quad \forall i \in I; \forall k \in K \quad (3.1)$$

$$z_i = \min \left(1, \sum_{k \in K} y_{ik} \right) \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

Os parâmetros utilizados no modelo são:

CI – custo médio de instalação de um ponto de coleta;

CO – custo de oportunidade (por kg) de REEE;

CV_k – capacidade de carga do veículo k (em kg);

DM – demanda total, isto é, quantidade de REEE gerada em todos os pontos de demanda (em kg);

PC_i – capacidade máxima do ponto de coleta i (em kg). Este parâmetro é utilizado devido à restrições no espaço físico onde deve ser instalado o ponto de coleta;

S_{id} – custo da distância do nó de demanda d ao ponto i ;

T_{ijk} – custo de transporte do veículo k entre i e j .

A seguir são apresentadas a Função Objetivo e as restrições.

-Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z = & \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} \sum_{k \in K} x_{ijk} T_{ijk} + CO \left(DM - \sum_{i \in I} r_i z_i \right) + CI \sum_{i \in I} z_i \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} z_i S_{id} \end{aligned} \quad (3.3)$$

-Restrições:

$$\sum_{j \in Q} x_{jik} = \sum_{j \in Q} x_{ijk} \quad \forall i \in I; \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in Q} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in Q: i \neq n; \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in Q} \sum_{k \in K} x_{0jk} \geq 1 \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{k \in K} x_{ink} \geq 1 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} r_i z_i \leq DM \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in I} r_i y_{ik} \leq CV_k \quad \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$\sum_{k \in K} r_i y_{ik} \leq PC_i \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$\sum_{i, j \in U} x_{ijk} \leq |U| - 1 \quad \forall k \in K; \forall U \subset Q \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in Q} x_{i0k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$\sum_{j \in Q} x_{njk} = 0 \quad \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in I; \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I; \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (3.16)$$

$$r_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (3.17)$$

A Equação (3.3) é a Função Objetivo a ser minimizada, a qual é dividida em quatro parcelas. A primeira se refere aos custos de transporte dos veículos, os quais devem se deslocar entre os pontos de recolhimento localizados pelo modelo com a melhor trajetória em termos de custo. A segunda parcela se trata do custo de oportunidade referente aos REEE não recolhidos, isto é, o valor perdido ao não recolher determinada quantidade de resíduos. A diferença entre a demanda total e as quantidades recolhidas em cada ponto de coleta resulta na quantidade de *e-waste* não recolhida. Dessa forma, quanto mais resíduos coletados, menor o custo. O custo de oportunidade por kg é tomado como o valor que seria ganho ao se coletar e reutilizar os resíduos. Mas como são muitos os tipos de *e-waste*, este valor é considerado, para fins de simplificação, como uma média dos valores ganhos na coleta e reutilização de todos os tipos de resíduos. A terceira parte da Função Objetivo se refere ao custo de instalação dos pontos de coleta; sua consideração faz-se importante para não possibilitar a solução de que os

pontos devem ser instalados indefinidamente. A quarta parcela mostra o custo da distância dos nós de demanda até chegar aos pontos de coleta; é importante que estes estejam localizados relativamente próximos à demanda.

As Restrições (3.4) garantem que o veículo deixe o ponto de coleta uma vez visitado, fazendo com que haja continuidade no trajeto, ou seja, se o veículo vai a um dado ponto, ele precisa ir desse ponto para outro local. Excetua-se dessa restrição os pontos da origem e da estação de tratamento (perceba-se que as restrições são para todo $i \in I$, conjunto este que não contém 0 e n), isto é, após chegar em n , o veículo não precisa ir mais para outro ponto e o veículo também não percorre de quaisquer pontos até à origem, como será mostrado pouco adiante nas Restrições (3.12) e (3.13).

O conjunto de Restrições (3.5) assegura que o veículo, ao sair de um nó (ponto), só pode ir para até um nó, ou seja, o veículo irá para apenas um lugar de cada vez. Excetua-se dessa restrição a estação de tratamento n , pois ao chegar neste local, o veículo deve finalizar seu trajeto. A Restrição (3.6) garante que a rota percorrida por todos os veículos de coleta comece na origem. A desigualdade ocorre, pois mais de um veículo pode ser necessário para realizar a coleta. A Restrição (3.7) garante que a rota percorrida termine na estação de tratamento de resíduos. Mais uma vez a desigualdade ocorre, pois mais de um veículo pode ser usado e todos eles devem chegar à estação de tratamento de resíduos.

Como o modelo busca aumentar a quantidade de resíduos recolhidos para minimização do custo de oportunidade conforme a segunda parcela da Equação (3.3), a Restrição (3.8) impede que essa quantidade exceda a demanda, o que é realisticamente impraticável; isto é, é impossível recolher mais do que é depositado nos pontos. A Restrição (3.9) impede que a quantidade de *e-waste* recolhida nos pontos de coleta por cada veículo exceda a capacidade de carga do veículo. O conjunto de Restrições (3.10) faz com que a quantidade estimada de resíduos recolhidos em cada ponto de coleta não exceda a capacidade desses pontos; essa capacidade pode existir por restrições no espaço físico, entre outros fatores. Por exemplo, pode haver pouco espaço para a instalação de um ponto de coleta com tamanho grande. Assim, esta restrição impede que se recolham mais resíduos do que o ponto de coleta suporta.

As Restrições (3.11) impossibilitam a formação de sub-rotas, garantindo a continuidade do percurso da origem até à estação de tratamento; nessa restrição, U representa todas as combinações de pontos em uma dada sub-rotas com $|U|$ pontos. Essas restrições foram propostas por Dantzig *et al.* (1954) para eliminação de sub-rotas.

A Restrição (3.12) assegura que o veículo não volte ao ponto inicial. A Restrição (3.13) garante o destino final do veículo na estação de tratamento n . Por fim, as Restrições de (3.14) à (3.17) tratam da natureza das variáveis de decisão.

O modelo matemático apresentado se trata de um modelo de Programação Não-Linear Inteira Mista, tendo em vista que as variáveis, com exceção de uma, assume apenas valores inteiros (mais especificamente, binários) e, além disso, as estruturas da Função Objetivo e de algumas restrições são de natureza não linear devido à multiplicação entre variáveis.

Percebe-se que este modelo, ao tratar do problema de localização de pontos de coleta, integra a questão do roteamento dos veículos, diferindo da abordagem de Mar-Ortiz *et al.* (2011), que os trata separadamente, aumentando a complexidade da análise do problema. Hosseini *et al.* (2019), por outro lado, também realiza essa integração, porém, o modelo dos autores considera que a disposição dos clientes em devolver os produtos depende de um incentivo financeiro unitário oferecido pela empresa de coleta; porém, este incentivo financeiro pode não ser muito rentável já que o seguinte comportamento é factível, segundo os próprios autores: quando a empresa oferece um valor de incentivo mais alto, a disposição dos clientes pode aumentar, mas o lucro unitário diminui. Ainda mais, destaca-se que se o incentivo for menor, a disposição dos clientes pode ser baixa e o lucro também pode não ser tão alto.

Não obstante, considera-se neste trabalho que a disposição dos consumidores em depositar os resíduos não é determinada por incentivos financeiros. Assim, a demanda de REEE considerada nesta modelagem não é calculada com base nesses incentivos, mas esta é considerada fixa no momento da resolução do modelo. Para obter este parâmetro, toma-se a geração total de REEE no local onde se pretende aplicar o modelo.

O modelo proposto também considera a limitação de carga dos veículos de coleta, porém não trata a questão de otimização do carregamento, isto é, como transportar os materiais da melhor forma. Isto é abordado em Nowakowski (2017), juntamente com o problema de roteirização, porém, no caso desta dissertação tal abordagem não é adequada, pois não se sabe de antemão a natureza dos componentes, isto é, seu tamanho, forma, etc. Esta inadequação também se enquadra com relação à abordagem de Habibi *et al.* (2017a), onde, para realizar a desmontagem dos componentes, é considerado que a estrutura do resíduo já é conhecida.

Outros trabalhos encontrados na literatura tratam da questão da coleta móvel, isto é, os materiais são coletados diretamente de residências ou empresas, por meio de um cronograma de coleta local. Para isto, variáveis como a satisfação dos clientes (NOWAKOWSKI *et al.*,

2017) e o tempo para realização da coleta são enfatizadas (MAR-ORTIZ *et al.*, 2013). Nesta dissertação, entretanto, a coleta considerada é a estacionária, que se dá nos centros de coleta municipais. Sendo assim, a questão do tempo para realizar as coletas e a mensuração da satisfação das pessoas não faz parte deste contexto.

Este modelo também difere da abordagem encontrada na literatura em que é feito um cálculo para encontrar a quantidade de pontos de coleta necessários para atender a produção do lixo reciclável, utilizando esta quantidade como *input* para o modelo matemático. No caso desta presente proposta, a quantidade de pontos de coleta é determinada pelo próprio modelo, como *output*.

Neste modelo é de se destacar a consideração do custo de oportunidade no cálculo da Função Objetivo, fato este que não foi considerado em outros modelos, inclusive nos modelos supracitados, com exceção de Habibi *et al.* (2017a); porém, a abordagem utilizada pelos autores difere do escopo desta dissertação, já que estes tratam da questão do dimensionamento dinâmico de lote e do roteamento dos veículos em duas fases distintas. A utilização do custo de oportunidade é relevante, pois este quantifica o impacto negativo causado se os REEE não forem recolhidos, ressaltando a vigência do problema.

Com tudo isto, ressalta-se que este modelo integra os problemas de localização de pontos de coleta com a roteirização dos veículos em um único modelo, tratando ainda a questão da carga dos veículos de coleta de modo compatível com o contexto local, isto é, não se sabe a natureza dos REEE que serão coletados e, com isso, a otimização do carregamento dos resíduos, fato presente em outros modelos, é prescindível. Além disso, a demanda no modelo é considerada fixa no momento de sua utilização, não cabendo a utilização de incentivos financeiros para sua determinação, pois esta política de incentivos não definiria adequadamente o contexto do problema.

Por fim, o modelo ainda incorpora a determinação das quantidades recolhidas em cada ponto de coleta. Essa distribuição geográfica nas quantidades recolhidas dos pontos, ainda que feita de forma livre, é importante para determinar o quanto de demanda ainda precisa ser satisfeita. Cabe destacar que isto é realizado desta forma, pois é muito difícil determinar a quantidade de REEE demandada por cada nó de demanda. Apesar dessa incerteza, o modelo ainda assim é solvido de forma a ter um panorama geral do quanto de *e-waste* é coletado e como isto impacta o custo de oportunidade.

3.2 EXECUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O presente modelo matemático para localização de pontos de coleta de REEE foi executado em forma de teste na cidade de Caruaru – PE, no bairro Maurício de Nassau, a fim de avaliar a sua funcionalidade. A cidade como um todo não foi utilizada para aplicação, haja vista a complexidade para se encontrar nós de demanda razoáveis em toda a cidade e, além disso, o uso de diversos locais candidatos a um ponto de coleta, em amplitude plenificada, tornaria a instância do problema sobremaneira grande para resolução em tempo aceitável. Para isto seria necessário a implementação do problema através do uso de heurísticas específicas para resolução em tempo aceitável.

Nesta dissertação foi utilizado o *software* Evolver 7.6, que é um *software* de otimização que utiliza Algoritmo Genético, dentre outros métodos, para encontrar soluções dos mais variados tipos de problema, inclusive de problemas não lineares complexos. Neste caso, a utilização de GAs no *software* chama atenção pelo fato de, além de serem os métodos mais utilizados neste tipo de problema, serem capazes de avaliar muitas soluções ao mesmo tempo, o que contribui para uma possível convergência a um ótimo global. Ainda mais, podem ser combinados com outros métodos para superar algumas de suas limitações (RACHIH *et al.* 2018). Mas apesar do uso de GA, o *software* em apreço não se mostrou capaz de encontrar uma solução em tempo hábil para o modelo com grandes instâncias. Porém seu uso nos casos-teste, de instâncias menores, foi útil para sua resolução. Além de tudo, essa ferramenta foi utilizada devido a sua interface bastante fácil e intuitiva.

O bairro Maurício de Nassau da cidade de Caruaru – PE é um bairro com bastante comércio e alto fluxo de pessoas. Sua escolha para aplicação do modelo matemático se deu devido a essas características e à facilidade um pouco maior quanto ao posicionamento dos nós de demanda e dos locais candidatos.

O Mapa 2 mostra o referido bairro de forma destacada e também os pontos de demanda (A, B, C, D, E) e locais candidatos a serem pontos de coleta (1, 2, 3, 4, 5), cabendo destacar que os nós de demanda foram posicionados de forma empírica, pois, segundo Oliveira (2012), não existe uma solução genérica para contemplar a tarefa de encontrar os pontos de demanda. O autor destaca que essa tarefa vai sempre depender das características individuais de cada contexto, e isso renderia uma outra pesquisa à parte.

Portanto, os pontos de demanda foram considerados, por exemplo, nas proximidades de uma escola (ponto D), centro de aglomerados de ruas (ponto E), no *shopping* (ponto A), e locais arbitrários (B e C). Ademais, os locais candidatos também foram posicionados de

forma empírica, considerados, por exemplo, nas proximidades de uma loja de informática (ponto 4) e conglomerado de ruas (ponto 5). Alguns nós de demanda também são locais candidatos a pontos de coleta, e isto implica no fato de que um ponto de recolhimento pode ser localizado exatamente em um nó de demanda.

Conforme mostrado no Mapa 2, a aplicação do modelo matemático primeiramente considera um contexto com 5 pontos potenciais para a instalação de um ponto de coleta, 5 nós de demanda e 3 veículos disponíveis para realizar o recolhimento dos resíduos. Foi considerado que a frota dos veículos é homogênea, isto é, os veículos utilizados são de uma mesma natureza, possuindo basicamente os mesmos custos de transporte e capacidade.

Mapa 2 - Bairro Maurício de Nassau, Caruaru - PE



Fonte: Adaptado de Google Maps (2019)

Para obtenção dos custos de transporte entre os pontos candidatos (T_{ijk}) e os custos da distância entre os nós de demanda e os pontos (S_{id}), foram levadas em conta as mínimas

distâncias aproximadas entre os pontos, considerando a trajetória no sentido correto do fluxo veicular das ruas. Assim, multiplicando-se essas distâncias (em km) pelo consumo médio de diesel dos veículos por quilômetro (litro/km) e também pelo preço médio do combustível (R\$/litro), têm-se os valores dos custos de transporte (em R\$) entre os pontos i e j e também entre os nós de demanda e os pontos candidatos: T_{ijk} e S_{id} . Por exemplo, se o veículo 1 consome em média 0,5 litros/km de diesel e a distância entre os pontos candidatos 1 e 2 for de 3 km, o veículo consome ao todo $3 \times 0,5 = 1,5$ litro. Se o preço médio do combustível for R\$ 4,00/litro, então o custo entre as distâncias (T_{121}) será de $1,5 \times 4 = \text{R}\$6,00$. O mesmo cálculo é usado para obter os custos da distância entre os nós de demanda e os pontos (S_{id}).

As distâncias entre os pontos candidatos a ponto de coleta e as distâncias entre os nós de demanda e os pontos candidatos foram obtidas através do Google Maps (2019) e estão mostradas na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. O consumo dos veículos considerado é de 0,30 litros/km e o preço médio do combustível por litro utilizado é de R\$ 3,72, com base na média dos preços obtida pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em Pernambuco no período de junho de 2019. Assim, através destes parâmetros, os custos T_{ijk} e S_{id} foram calculados conforme o procedimento apresentado mais acima e estão mostrados na Tabela 3 e na Tabela 4, respectivamente. Vale destacar que esses custos são baixos devido às curtas distâncias entre os pontos do bairro. Em um problema envolvendo o município em sua totalidade, esses custos seriam muito mais significativos.

Tabela 1 - Distâncias (em km) entre os locais candidatos a ponto de coleta

	0	1	2	3	4	5	n
0	-	2,70	3,20	3,40	3,50	4,50	-
1	2,70	-	0,70	1,30	0,90	1,60	6,00
2	3,20	0,80	-	1,30	1,00	1,80	5,80
3	3,40	1,30	1,10	-	0,70	1,10	6,20
4	3,50	1,20	0,90	1,00	-	0,70	6,00
5	4,50	1,60	1,00	1,30	0,70	-	5,20
n	-	6,00	5,80	6,20	6,00	5,20	-

Tabela 2 - Distâncias (em km) entre os nós de demanda e os locais candidatos a ponto de coleta

	1	2	3	4	5
A	0	0,70	1,30	0,90	1,60
B	0,65	0,40	1,00	0,60	1,30
C	0,80	0	1,30	1,00	1,80
D	1,30	1,10	0	0,70	1,10
E	1,20	0,65	1,20	0,45	0,35

Seria de grande valia a obtenção das localizações exatas do ponto de partida dos veículos (ponto 0) e da estação de tratamento de REEE (n) para utilização no modelo. Estas, porém, ainda não existem na cidade em apreço. Para obtê-las, outra análise seria necessária. No entanto, optou-se por localizar esses pontos em lugares fora do bairro Maurício de Nassau, na tentativa de realizar uma aproximação mais realística da localização desses pontos. A origem, o ponto de partida dos veículos, estaria localizada mais próxima ao bairro e a estação de tratamento estaria em uma região mais periférica da cidade. Assim, as distâncias com relação ao ponto de origem (0) e estação de tratamento (n) são hipotéticas.

Tabela 3 - Custos de transporte entre os pontos candidatos (T_{ijk})

	0	1	2	3	4	5	n
0	-	3,01	3,57	3,79	3,91	5,02	-
1	3,01	-	0,78	1,45	1,00	1,79	6,70
2	3,57	0,89	-	1,45	1,12	2,01	6,47
3	3,79	1,45	1,23	-	0,78	1,23	6,92
4	3,91	1,34	1,00	1,12	-	0,78	6,70
5	5,02	1,79	1,12	1,45	0,78	-	5,80
n	-	6,70	6,47	6,92	6,70	5,80	-

A seguir estão os demais parâmetros utilizados na execução do modelo, com valores obtidos de forma empírica. A quantidade de REEE gerada em todos os pontos de demanda – isto é, a demanda total (DM) – considerada foi de 250 kg. O custo médio para instalar um ponto de coleta (CI) é considerado de R\$ 500,00. O custo de oportunidade (por kg) com relação aos resíduos não recolhidos (CO): R\$ 60,00. A capacidade de carga dos três veículos (CV_k), ou seja, o limite máximo de REEE que os veículos são capazes de transportar é de 100 kg e por fim, a capacidade máxima de todos os pontos de coleta i (PC_i) é considerada de 100 kg.

Tabela 4 - Custos da distância entre os nós de demanda e os pontos candidatos a pontos de coleta (S_{id})

	1	2	3	4	5
A	0	0,78	1,45	1,00	1,79
B	0,73	0,45	1,12	0,67	1,45
C	0,89	0	1,45	1,12	2,01
D	1,45	1,23	0	0,78	1,23
E	1,34	0,73	1,34	0,50	0,39

O *software* Evolver 7.6 foi utilizado para resolução deste primeiro cenário já apresentado. A modelagem no programa é feita de modo muito similar ao suplemento Solver do Excel. Por fim, seleciona-se o modo de otimização, isto é, se será utilizado o modo

automático, onde o próprio *software* seleciona o mecanismo de otimização e suas respectivas configurações, ou se será usado apenas Algoritmo Genético, definindo manualmente o tamanho da população e as taxas de *crossover* e de mutação ou ainda se será usada uma combinação dos métodos Busca Tabu, Redes Neurais, dentre outros. Neste caso, o programa foi executado em seu modo automático, haja vista a dificuldade para definição dos métodos e parâmetros em face à complexidade do modelo. O (Apêndice A) mostra parte dos valores finais obtidos das variáveis de decisão e algumas restrições. O progresso da resolução pode ser acompanhado em um quadro conforme mostrado no (Apêndice B), onde é possível verificar a evolução no tempo de execução e o melhor valor encontrado. Para esta execução e a próxima ainda a ser apresentada, foi utilizado um computador com processador Intel Core i3, com 2 GB de memória RAM.

O Evolver 7.6 forneceu a solução de que se devem instalar pontos de coleta em 1, 2 e 3, onde, em cada ponto, um veículo diferente deve fazer o recolhimento dos resíduos, totalizando um custo de R\$ 1.533,71. Em uma situação real, entretanto, não se sabe de antemão a distribuição da demanda total entre os pontos a serem instalados, ou seja, não se sabe a quantidade que será recolhida em cada ponto, porém, este modelo estima de forma livre a quantidade de REEE a ser recolhida em cada ponto de coleta. No referido cenário, a quantidade a recolher nos três pontos é de aproximadamente 98, 77 e 75 kg de resíduos, respectivamente. Assim, é possível saber o quanto da demanda total foi satisfeita. Neste caso, toda a demanda de 250 kg de *e-waste* é satisfeita, com sobejo de 50 kg da carga total dos veículos. Este resultado foi encontrado com um tempo de execução de aproximadamente 33 minutos. Isso pode ser verificado em um relatório emitido pelo *software* semelhante ao mostrado no (Apêndice C).

Para a construção de um segundo cenário, os parâmetros permanecem os mesmos, mas com as seguintes exceções: a disponibilidade veicular foi reduzida para apenas um transporte com capacidade de carga igual a 200 kg e a demanda total foi aumentada para 300 kg. Se ainda a capacidade de cada ponto de coleta for reduzida (considerada 60 kg), supõe-se que os pontos devem ser mais distribuídos, pois o veículo precisará percorrer mais pontos para que sua carga de transporte possa ir sendo completada, e não apenas um único, como no caso anterior.

Este último caso também foi testado no Evolver 7.6 e resultou, como esperado, em mais pontos de coleta, totalizando quatro pontos localizados em 1, 2, 3 e 4, com quantidade estimada a recolher de aproximadamente 60, 57, 27 e 56 kg, respectivamente. Neste caso, 100 kg de *e-waste* deixarão de ser recolhidos devido à limitação da capacidade de carga do

veículo. O custo totaliza aproximadamente R\$ 8.030,00. A rota a ser percorrida pelo veículo também foi obtida pelo *software* e está mostrada no Mapa 3, ressaltando-se que as rotas com relação a 0 e n não são mostradas devido à suposição de que as suas localizações estão fora do bairro em análise. Neste segundo cenário, este resultado foi encontrado mais rapidamente, em 15 minutos, aproximadamente. Isso pode ser verificado no relatório mostrado no (Apêndice D).

Mapa 3 - Rota a ser percorrida pelo veículo



Fonte: Adaptado de Google Maps (2019)

4 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente aumento de *e-waste* e seus impactos negativos impõem a necessidade de investimento no correto gerenciamento destes resíduos. Ao fazer assim, os benefícios de sua gestão abarcam desde aspectos financeiros até socioambientais.

Neste sentido, esta dissertação propôs um modelo matemático para a localização de pontos de coleta de REEE. O objetivo consistiu na minimização dos custos de oportunidade, de transporte, de instalação e de distância entre demanda e ponto de coleta.

Antes disto, a fundamentação teórica é apresentada para um melhor embasamento do assunto tratado neste trabalho. Esta aborda aspectos da logística reversa, a qual se refere ao retorno dos resíduos. Também trata especificamente dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos e aspectos de sua gestão no âmbito nacional. O uso da Pesquisa Operacional no gerenciamento de REEE também é mostrado, com a apresentação de alguns métodos usados neste contexto. A modelagem para problemas de localização também é tratada.

Por fim, com o intuito de demonstrar a aplicabilidade do modelo matemático proposto, este foi resolvido utilizando o *software* Evolver 7.6 em dois cenários de teste com cinco pontos potenciais.

No primeiro cenário apresentado, com três veículos disponíveis para realizarem o recolhimento de REEE, todos os transportes foram necessários por causa da relativa baixa capacidade dos mesmos em comparação com a demanda total. Já a capacidade de 100 kg dos pontos de coleta contribui para o baixo número de pontos, pois apenas três (com capacidade total de recolher 300 kg de resíduos) já seriam suficientes para suprir a demanda de 250 kg; se esta capacidade fosse reduzida, mais pontos precisariam ser localizados a fim de suprir toda a demanda. Vale destacar ainda que toda a demanda foi satisfeita, havendo sobra na carga total dos veículos de 50 kg.

Os resultados para esse cenário construído são bastante intuitivos. Porém, tal análise é importante, pois se pretende verificar a funcionalidade do modelo, isto é, se o comportamento deste é razoável e se reflete questões realísticas no contexto de gerenciamento de *e-waste*.

O segundo cenário construído segue uma direção oposta ao primeiro. Isto é importante para verificar a versatilidade do modelo matemático diante de contextos diferentes. Os resultados também são intuitivos a fim de verificar a compatibilidade do modelo com o problema tratado, o qual possui diversas faces. Logo, no segundo cenário, uma maior capacidade de carga do veículo combinada com uma menor capacidade dos pontos de coleta resultou em um maior número de pontos, com o transporte precisando percorrer mais pontos

para completar sua carga. Neste caso, 100 kg de *e-waste* deixarão de ser recolhidos devido à limitação da capacidade de carga do veículo com relação à demanda.

Portanto, verifica-se que a capacidade dos pontos de coleta é um parâmetro significativo para a quantidade de pontos de coleta, embora este parâmetro não seja o único que exerça influência sobre a quantidade de pontos. Por exemplo, se o custo de instalação aumentasse significativamente, é de se supor que menos pontos deveriam ser instalados.

Já a capacidade do veículo combinada com a capacidade dos pontos de coleta possui influência sobre sua trajetória, pois para que a carga do transporte possa ir sendo completada, este precisa percorrer mais pontos. Se, porém, a capacidade dos pontos de coleta for alta, o veículo pode não percorrer tantos pontos, já que recolhimento de REEE em um ponto de coleta pode aumentar muito a sua carga de transporte.

As respectivas localizações dos mesmos são influenciadas pelos custos das distâncias entre os pontos de coleta e das distâncias entre os nós de demanda e as instalações de coleta. Nos testes apresentados, os valores desses custos foram baixos porque foram utilizadas distâncias de pontos dentro do bairro. Em um âmbito mais geral, considerando toda a cidade, esses custos seriam ainda mais significativos no resultado total dos custos.

Assim, o modelo matemático proposto é capaz de mostrar quantos pontos de coleta instalar, onde cada um deve estar localizado e quais as quantidades estimadas a serem recolhidas nos pontos. Esta estimativa é importante porque o custo de oportunidade pode ser calculado com base na diferença entre a demanda total e a quantidade recolhida estimada.

Os resultados, além de tudo, mostram a sensibilidade da quantidade dos pontos de coleta com relação à demanda e capacidade das instalações, embora os outros parâmetros também sejam bastante significativos quanto à definição dessa quantidade. Já a capacidade do veículo combinada com a capacidade dos pontos de coleta possui influência sobre sua trajetória. Ademais, a localização dos pontos depende diretamente dos custos das distâncias entre os pontos de coleta e das distâncias entre os nós de demanda e as instalações de coleta.

Dessa forma, o modelo foi considerado satisfatório quanto à sua proposta, podendo tornar-se um acessório para uma melhor tomada de decisão. Por outro lado, o modelo considera como simplificação o fato de que toda a demanda deve depositar os resíduos nos pontos, o que não é praticável na realidade. Isso, porém, pode ser estimulado pela própria proximidade dos pontos de coleta à demanda e por intermédio de políticas públicas de incentivo ao descarte adequado. Acrescenta-se que o modelo não considera a localização ideal para o ponto de partida dos veículos e para a estação de tratamento, pois para isto outra análise seria necessária.

O modelo possui ainda a dificuldade inerente a um problema *NP-hard*, isto é, o alto tempo computacional para solucionar o problema. Assim, fez-se necessário auxiliar o modelo em algumas atribuições para que este chegasse a uma solução de baixo custo mais rapidamente. Por outro lado, isso pode ser superado mediante a utilização de uma heurística específica para sua resolução.

Além disso, a amplitude da aplicação do modelo se deu de forma reduzida, concentrando-se em apenas um bairro da cidade de Caruaru, e com alguns dados conjecturados.

Portanto, sugere-se para trabalhos futuros a aplicação do modelo com a utilização de todos os dados realísticos, já que em grande parte dos parâmetros foram colocados valores hipotéticos.

Propõe-se ainda o desenvolvimento de um algoritmo baseado em alguma heurística para resolução do modelo, podendo-se implementar o algoritmo em ferramentas como, por exemplo, o *software* R ou linguagem Julia, especialmente o pacote JuMP, que suporta mais de 10 resolvidores de Programação Linear, Linear Inteira Mista, Não Linear, dentre outros (CASTELLUCCI, 2017). Estes podem ser utilizados para aplicação do modelo em cidades de diferentes portes, exemplificando a cidade de Caruaru – PE haja vista a sua grande densidade populacional com significativa contribuição ao impacto ambiental causado pela geração de *e-waste* no estado.

REFERÊNCIAS

ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. 2013. 179 p.

ABISOYE OPEYEMI A.; BOBOYE FATOBA; ABISOYE BLESSING O. Design of a computerized inventory management system for supermarkets. *International Journal of Science and Research*, v. 2, p. 340–344, 2013.

ACHILLAS, C.; VLACHOKOSTAS, C.; AIDONIS, D.; MOUSSIOPOULOS, N.; IAKOVOU, E.; BANIAS, G. Optimising reverse logistics network to support policy-making in the case of Electrical and Electronic Equipment. *Waste Management*, v. 30, n. 12, p. 2592-2600, 2010.

ADASME, Pablo. p-median based formulations with backbone facility locations. *Applied Soft Computing*, v. 67, p. 261-275, 2018.

AQUINO, Ítalo; SILVA, Lúcio. *Proposição de um Modelo Matemático para Localização de Pontos de Coleta de Resíduos Elétricos e Eletroeletrônicos*. LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional: SBPO/ SOBRAPO, 2019.

AZARMAND, Z., & NEISHABOURI, E. (2009). Location allocation problem. *Facility location* (pp.93-109). Springer.

BALDÉ, C.P.; FORTI V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

BALLOU, Ronald H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/Logística Empresarial*; tradução: Raul Rubenich. 5. ed. Porto Alegre. Bookman, 2006.

BÍBLIA, A. T. Provérbios. In BÍBLIA. Português. *A Bíblia Sagrada – Harpa Sagrada*. Tradução de João Ferreira de Almeida. Barueri, SP: Sociedade Bíblica do Brasil. Rio de Janeiro, RJ: Casa Publicadora das Assembleias de Deus, 2009. p. 864.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 3. ed., reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017.

CARLING, Kenneth; HAN, Mengjie; HÅKANSSON, Johan; REBREYEND, Pascal. Testing the gravity p-median model empirically. *Operations Research Perspectives*, v. 2, p. 124-132, 2015.

CASTELLUCCI, Pedro Belin. Julia e jump: novas ferramentas para programação matemática. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, v. 9, n. 2, p. 48-61, 2017.

CHAVES, Antônio Augusto; BIAJOLI, Fabrício Lacerda; MINE, Otávio Massashi; SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. Metaheurísticas híbridas para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. *Revista Produção*, v. 17, n. 2, 2007.

CRAINIC, T.; TOULOUSE, M. Parallel strategies for meta-heuristics. In F. Glover, & G. A. Kochenberger (Vol. Eds.), *International series in operations research & management Science*, v. 57. Boston, MA: Springer, 2010.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; LENNY KOH, S.C.; ROSA, P. Recycling of WEEEs: an economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 263–272, 2015.

DANTZIG, George; FULKERSON, Ray; JOHNSON, Selmer. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*, v. 2, n. 4, p. 393-410, 1954.

DA SILVA, Lorena Albuquerque Adriano; PIMENTA, Handson Dias; DE SOUZA CAMPOS, Lucila Maria. Logística reversa dos resíduos eletrônicos do setor de informática: realidade, perspectivas e desafios na cidade do Natal-RN. *Revista Produção Online*, v. 13, n. 2, p. 544-576, 2013.

DE OLIVEIRA, Camila Reis; BERNARDES, Andréa Moura; GERBASE, Annelise Engel. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Management*, v. 32, n. 8, p. 1592-1610, 2012.

DE SOUZA, R.G.; CLÍMACO, J.C.N.; SANT'ANNA, A.P.; ROCHA, T.B.; DO VALLE, R. DE A.B.; QUELHAS, O.L.G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Management*, v. 57, p. 46–56, 2016.

DIAS, Pablo; MACHADO, Arthur; HUDA, Nazmul; BERNARDES, Andréa Moura. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: a study on the Brazilian recycling routes. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 7-16, 2018.

DUTRA, Renato Meira; YAMANE, Luciana Harue; SIMAN, Renato Ribeiro. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: A case study of 16 Brazilian cities. *Waste management*, v. 77, p. 50-58, 2018.

ECHEGARAY, Fabian; HANSSTEIN, Francesca Valeria. Assessing the intention-behavior gap in electronic waste recycling: the case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 180-190, 2017.

ELIA, Valerio; GNONI, Maria Grazia; TORNESE, Fabiana. Improving logistic efficiency of WEEE collection through dynamic scheduling using simulation modeling. *Waste Management*, v. 72, p. 78-86, 2017.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.

GMCONS. Disponível em: <<http://www.gmcons.com.br/gmclog/admin/VisualizarPostosMapaCliente.aspx>>. Acesso em 07 de março de 2019.

GREEN ELETRON. Disponível em: <<https://www.greeneletron.org.br>>. Acesso em 07 de março de 2019.

GUARNIERI, Patrícia; E SILVA, Lúcio Camara; LEVINO, Natallya A. Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1105-1117, 2016.

HABIBI, M. K. K.; BATTAÏA, O.; CUNG, V-D; DOLGUI, A. An efficient two-phase iterative heuristic for Collection-Disassembly problem. *Computers & Industrial Engineering*, v. 110, p. 505-514, 2017.

HABIBI, M. K. K.; BATTAÏA, O.; CUNG, V-D; DOLGUI, A. Collection-disassembly problem in reverse supply chain. *International Journal of Production Economics*, v. 183, p. 334-344, 2017.

HERDA, Miloš. Parallel genetic algorithm for capacitated p-median problem. *Procedia engineering*, v. 192, p. 313-317, 2017.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8. ed. Bookman, 2010.

HOSSEINI, Mozhde Bagheri; DEHGHANIAN, Farzad; SALARI, Majid. Selective capacitated location-routing problem with incentive-dependent returns in designing used products collection network. *European Journal of Operational Research*, v. 272, n. 2, p. 655-673, 2019.

IIZUKA, Toshiaki. An empirical analysis of planned obsolescence. *Journal of Economics & Management Strategy*, v. 16, n. 1, p. 191-226, 2007.

JUNQUEIRA, Leonardo; MORABITO, Reinaldo. Heuristic algorithms for a three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem in a carrier. *Computers & Industrial Engineering*, v. 88, p. 110-130, 2015.

KARIV, Oded; HAKIMI, S. Louis. An algorithmic approach to network location problems. I: The p-centers. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, v. 37, n. 3, p. 513-538, 1979.

KHOSRAVI, Shahrzad; JOKAR, Mohammad Reza Akbari. Facility and hub location model based on gravity rule. *Computers & Industrial Engineering*, v. 109, p. 28-38, 2017.

KOLIAS, C.; KAMBOURAKIS, G.; MARAGOUDAKIS, M. Swarm intelligence in intrusion detection: A survey. *Computers and Security*, v. 30, n. 8, p. 625-642, 2011.

LAMBERT, Serge; RIOPEL, Diane; ABDUL-KADER, Walid. A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers & Industrial Engineering*, v. 61, n. 3, p. 561-581, 2011.

LU, B.; LIU, J.; YANG, J.; LI, B. The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, p. 148-158, 2015.

MAR-ORTIZ, Julio; ADENSO-DIAZ, Belarmino; GONZÁLEZ-VELARDE, José Luis. Design of a recovery network for WEEE collection: the case of Galicia, Spain. *Journal of the Operational Research Society*, v. 62, n. 8, p. 1471-1484, 2011.

MAR-ORTIZ, Julio; GONZÁLEZ-VELARDE, José Luis; ADENSO-DÍAZ, Belarmino. Designing routes for WEEE collection: the vehicle routing problem with split loads and date windows. *Journal of Heuristics*, v. 19, n. 2, p. 103-127, 2013.

MLADENović, Nenad; BRIMBERG, Jack; HANSEN, Pierre; MORENO-PÉREZ, José A. The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. *European Journal of Operational Research*, v. 179, n. 3, p. 927-939, 2007.

NAGURNEY, Anna; TOYASAKI, Fuminori. Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 41, n. 1, p. 1-28, 2005.

NOWAKOWSKI, Piotr. A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: Container loading and vehicle routing problems – A case study of Poland. *Waste Management*, v. 60, p. 494-504, 2017.

NOWAKOWSKI, Piotr; MRÓWCZYŃSKA, Bogna. Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy-Comparative study for rural and urban settlements. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, p. 93-107, 2018.

NOWAKOWSKI, Piotr; KRÓL, Aleksander; MRÓWCZYŃSKA, Bogna. Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. *Waste Management*, v. 69, p. 377-392, 2017.

OLIVEIRA, M. G. Sistema de localização de facilidades: uma abordagem para mensuração de pontos de demanda e localização de facilidades. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

ONGONDO, Francis O.; WILLIAMS, Ian D.; CHERRETT, Tom J. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste management*, v. 31, n. 4, p. 714-730, 2011.

PERNAMBUCO. Lei nº 15.084, de 06 de setembro de 2013. Dispõe sobre a obrigatoriedade de instalação de coletores de lixo eletrônico pelas empresas que comercializam pilhas, baterias e aparelhos eletrônicos de pequeno porte, 2013.

PRAJAPATI, Himanshu; KANT, Ravi; SHANKAR, Ravi. Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 2018.

PUCKETT, J.; SMITH, Ted. Exporting harm: the high-tech trashing of Asia. The Basel Action Network. *Silicon Valley Toxics Coalition*, Seattle, 2002.

RACHIH, Hanane; MHADA, Fatima Zahra; CHIHEB, Raddouane. Meta-heuristics for reverse logistics: a literature review and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 2018.

ROGERS, D. S.; LAMBERT, D. M.; CROXTON, K. L.; GARCÍA-DASTUGUE, S. J. The returns management process. *The International Journal of Logistics Management*, v. 13, n. 2, p. 1-18, 2002.

SADRNIA, A.; SOLTANI, H. R.; ZULKIFLI, N.; ISMAIL, N.; ARIFFIN, M. K. A. A review of nature-based algorithms applications in green supply chain problems. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 6, n. 3, p. 204, 2014.

SHI, J.; Liu, Z.; Tang, L.; Xiong, J. Multi-objective optimization for a closed-loop network design problem using an improved genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, v. 45, p. 14-30, 2017.

SIGRIST, C. S. L.; FONSECA, L. F. B.; VEIGA, J. M.; PAIVA, J. M. F.; MORIS, V. A. S. Desenvolvimento de ponto de coleta de resíduos eletroeletrônicos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 1423-1438, 2015.

SILVA, Ednael; DE ALMEIDA, Gabriel Oliveira; GUARNIERI, Patrícia; SILVA, Lúcio. *Uma Análise sobre o Uso da Pesquisa Operacional no Suporte ao Gerenciamento de Resíduos Eletroeletrônicos*. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia De Produção: ENEGEP/ ABEPRO, 2018.

SILVER, Edward Allen. An overview of heuristic solution methods. *Journal of the operational research society*, v. 55, n. 9, p. 936-956, 2004.

SLACK, Nigel; JOHNSTON, Robert; CHAMBERS, Stuart. *Administração da Produção*. 3. ed. São Paulo. Atlas, 2009.

SODHI, Manbir S.; REIMER, Bryan. Models for recycling electronics end-of-life products. *OR-Spektrum*, v. 23, n. 1, p. 97-115, 2001.

TASAN, A.S., GEN, M. A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, v. 62, n. 3, p. 755–761, 2012.

VOß, Stefan; WOODRUFF, David L. *Introduction to computational optimization models for production planning in a supply chain*. Springer Science & Business Media, 2006.

WAKOLBINGER, T.; TOYASAKI, F.; NOWAK, T.; NAGURNEY, A. When and for whom would e-waste be a treasure trove? Insights from a network equilibrium model of e-waste flows. *International Journal of Production Economics*, v. 154, p. 263-273, 2014.

WALTHER, G.; STEINBORN, J.; SPENGLER, T.S.; LUGER, T.; HERRMANN, C. Implementation of the WEEE-directive-economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* v. 47, n. 5-8, p. 461–474, 2010.

WU, T.-H.; CHANG, C.-C.; CHUNG, S.-H. A simulated annealing algorithm for manufacturing cell formation problems. *Expert Systems with Applications*, v. 34, n. 3, p. 1609-1617, 2008.

XAVIER, Lúcia Helena; VIEIRA, Rosineide; SOARES, Alessandro Diniz; MEDEIROS, Rodrigo Pessoa; MARTINS, Adriana; SILVEIRA, Maria Cireno; FERREIRA, Pyetro. *Resíduos Eletroeletrônicos na Região Metropolitana do Recife (RMR): Guia Prático para um Ambiente Sustentável*. 1. ed. Recife: Editora Massangana, 2014.

APÊNDICE A – PARTE DA INTERFACE DO PROBLEMA NO SOFTWARE EVOLVER 7.6

The screenshot displays the EVOLVER 7.6 software interface for a linear programming model. The main workspace is divided into several sections:

- Top Menu and Toolbar:** Includes options like 'Arquivo', 'Página Inicial', 'Inserir', 'Layout da Página', 'Fórmulas', 'Dados', 'Revisão', 'Exibição', 'POFement', 'Evolver', 'Definição do Modelo', 'Configurações', 'Iniciar Relatórios', 'Utilidades', and 'Ajuda'.
- Model Name:** 'AC8' is displayed in the top left corner.
- Costs de Transporte Table:** A table with 5 rows (0 to n) and 5 columns (1 to 5). Values range from 0 to 5.02.
- Costs de Distância Table:** A table with 5 rows (d1 to d5) and 5 columns (1 to 5). Values range from 0 to 1.79.
- Variables auxiliares (k1) Table:** A table with 5 rows (k=1) and 5 columns (1 to 5). Values are 0 or 1.
- Restrições Table:** A table with 5 rows (Rest 4 to Rest 5) and 5 columns (k=1 to k=5). Values are 0 or 1.
- Parameters Table:** A table with 5 rows (C0 to C4) and 5 columns (1 to 5). Values are 60, 250, 100, 500.
- Constraint Summary Table:** A table with 5 rows (Rest 6 to Rest 12) and 5 columns (k=1 to k=5). Values include 3, 3, 250, 100, 75, 385, 100.

**APÊNDICE B – PROGRESSO NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA NO *SOFTWARE*
EVOLVER 7.6**

26	3	0	0	0	0	0	0	0	0
27	4	0	0	0	0	0	0	0	0
28	5	0	0	0	0	0	0	0	0
29	n	0	0	0	0	0	0	0	0
30									

4	5
00	0

Progresso do Evolver

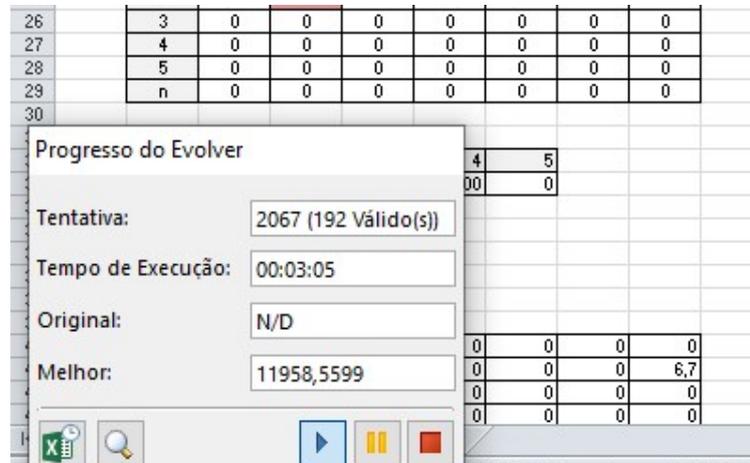
Tentativa: 2067 (192 Válido(s))

Tempo de Execução: 00:03:05

Original: N/D

Melhor: 11958,5599

0	0	0	0
0	0	0	6,7
0	0	0	0
0	0	0	0



APÊNDICE C – RELATÓRIO DO RESULTADO PARA O PRIMEIRO CENÁRIO

Resultados	
Valor Original	N/D
+ penalidades de restrições flexíveis	N/D
= resultado	N/D
Melhor Valor Encontrado	1533,71
+ penalidades de restrições flexíveis	0,00
= resultado	1533,71
Tempo para Encontrar Melhor Valor	0:33:08

APÊNDICE D – RELATÓRIO DO RESULTADO PARA O SEGUNDO CENÁRIO

Resultados	
Valor Original	N/D
+ penalidades de restrições flexíveis	N/D
= resultado	N/D
Melhor Valor Encontrado	8030,19
+ penalidades de restrições flexíveis	0,00
= resultado	8030,19
Tempo para Encontrar Melhor Valor	0:15:14