

UM ESTUDO SOBRE O PROBLEMA DA COLETA DO LIXO ELETRÔNICO

Silvana Nazaré de Freitas Avila

Universidade Federal Fluminense - UFF
Avenida General Milton Tavares de Souza, s/n, São Domingos, Niterói - RJ
silvanaavila@id.uff.br

Luiz Satoru Ochi, Simone de Lima Martins

Universidade Federal Fluminense - UFF
Avenida General Milton Tavares de Souza, s/n, São Domingos, Niterói - RJ
{satoru, simone}@ic.uff.br

RESUMO

A gestão do lixo eletrônico (e-lixo) se tornou um dos temas socioambientais mais críticos da atualidade, em virtude do aumento exponencial do volume de resíduos e do descarte inadequado. Diante desse cenário, a correta administração dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) é essencial para mitigar os desafios da logística reversa e reduzir os impactos ambientais decorrentes. Este trabalho apresenta modelagens avançadas aplicáveis ao Problema de Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE), utilizando modelos clássicos e similares da literatura. As implementações utilizam técnicas heurísticas, metaheurísticas e de hibridização para otimizar o tempo computacional, convergindo para soluções sub-ótimas ou ótimas. Esperamos contribuir com pesquisas futuras, trazendo benefícios como a redução de custos operacionais, minimização do tempo e distância percorrida pelos veículos, aumento da eficiência na coleta e cumprimento das regulamentações ambientais, essenciais para o contexto de cidades inteligentes.

PALAVRAS CHAVE. Cidades Inteligentes, Coleta Lixo Eletrônico, Logística Reversa, Inteligência computacional.

Tópicos: Logística Reversa, Otimização Combinatória, Logística de Transporte.

ABSTRACT

Electronic waste management (e-waste) has become one of the most critical socio-environmental issues today, due to the exponential increase in the volume of waste and its inadequate disposal. Given this scenario, the correct management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) is essential to mitigate the challenges of reverse logistics and reduce the resulting environmental impacts. This work presents advanced modeling applicable to the Electronic Waste Collection Problem (PCLE), using classic and similar models from the literature. The implementations use heuristics, metaheuristics and hybridization techniques to optimize computational time, converging to sub-optimal or optimal solutions. We hope to contribute to future research, bringing benefits such as reducing operational costs, minimizing time and distance traveled by vehicles, increasing collection efficiency and complying with environmental regulations, essential for the context of smart cities.

KEYWORDS. Smart Cities, Electronic Waste Collection, Reverse Logistics, Computational Intelligence.

Paper topics: Reverse Logistics, Combinatorial Optimization, Transport Logistics.

1. Introdução

O aumento no consumo de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) tem levado a um crescimento substancial na geração de resíduos eletrônicos, também conhecidos como lixo eletrônico. Esse cenário nos obriga a refletir sobre a escassez de matérias-primas e a crescente preocupação ambiental. Assim, é fundamental conscientizar a sociedade sobre a gestão apropriada desses resíduos, evitando o descarte inadequado e promovendo o reaproveitamento de materiais, o que reduz impactos ambientais, economiza energia, diminui custos de produção e melhora a imagem social das empresas, como discutido por [Rachih et al 2018]. Nesse contexto, nosso estudo foca na logística reversa aplicada ao problema da coleta de lixo eletrônico, explorando as técnicas mais eficientes para propor soluções. Essa temática é de grande relevância socioambiental, com várias aplicações práticas que são cruciais para a construção de cidades inteligentes e sustentáveis.

De acordo com [Rachih et al 2018], a logística reversa engloba sete áreas principais: roteirização de veículos de coleta de resíduos, desenho da rede logística, localização e alocação, planejamento da produção, montagem e desmontagem (incluindo manutenção, remanufatura, reciclagem ou descarte), gerenciamento de devoluções e gestão de estoque. [Islam e Huda 2018] destacam que o gerenciamento de devoluções de REEE envolve um alto grau de incerteza, devido a fatores como qualidade, quantidade e tempo, o que faz da logística reversa uma área que demanda atenção urgente. A coleta de lixo eletrônico, por exemplo, envolve desafios relacionados ao transporte, número de veículos, rotas percorridas e capacidade de carga dos caminhões.

O problema da coleta de resíduos eletrônicos (REEE) está vinculado ao problema mais amplo de roteirização de veículos (PRV), e, de forma mais específica, à coleta de lixo. Como mencionado por [Costa 2009], a coleta de lixo urbano, que inclui uma variedade de produtos descartados, ainda apresenta muitas lacunas que necessitam de pesquisa adicional para a proposição de soluções sustentáveis e otimizadas, que minimizem custos. A motivação para aprofundar o conhecimento nessa área é crescente, especialmente em um contexto em que o acúmulo de resíduos em lixões ainda representa um grave problema socioambiental no Brasil, com consequências negativas para o solo, os recursos hídricos e a saúde pública.

Segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, os EEE são classificados em quatro grandes categorias: linha branca (eletrodomésticos como geladeiras e fogões), linha marrom (equipamentos audiovisuais como televisores), linha azul (utensílios domésticos como liquidificadores), e linha verde (equipamentos de informática como computadores e celulares) [Aquino et al 2021]. O descarte inadequado desses materiais gera lixo eletrônico, também conhecido como WEEE ou e-waste.

No contexto da logística reversa do lixo eletrônico, a coleta é um dos fatores cruciais. Contudo, a conscientização do consumidor ainda é limitada, o que dificulta a implementação de estratégias eficazes de coleta. Como observado por [Singhal et al 2020], os consumidores precisam ser incentivados a devolver seus produtos usados ou danificados e informados sobre os pontos de coleta, tornando o processo mais viável e lucrativo. Muitas vezes, produtos eletroeletrônicos são descartados antes mesmo de atingirem o fim de sua vida útil, impulsionados por avanços tecnológicos e pela obsolescência programada, que visa aumentar o lucro com novas vendas. Isso contribui para o aumento significativo na produção de resíduos eletrônicos em escala global.

Com o avanço da Indústria 4.0 e a proliferação da Internet das Coisas (*IoT*), novos desafios surgem, uma vez que bilhões de dispositivos eletrônicos estarão conectados globalmente no futuro próximo. Isso aumentará ainda mais o volume de REEE, tornando essencial uma gestão eficiente desses resíduos para o reaproveitamento de recursos naturais e para evitar a contaminação ambiental por substâncias tóxicas presentes no e-lixo. Nesse cenário, a logística verde desempenha um papel fundamental, pois, como discutido por [Ubeda et al 2011], permite que as empresas adotem práticas logísticas sustentáveis, reduzindo os impactos ambientais através de mudanças operacionais. Além disso, a interconexão de objetos facilita a comunicação e a automatização de processos, o que é benéfico para aplicações em Cidades Inteligentes, como o uso de sensores para otimizar rotas de coleta de lixo, economizando combustível e reduzindo emissões de gases.

Este estudo abordará o problema de acúmulo de REEE sob a ótica do Problema da Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE), relacionando-o a problemas clássicos da literatura, como o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) e suas variantes. A pesquisa também incluirá uma comparação entre o PCLE e PRVs semelhantes, como o Problema de Roteamento de Veículo com Frota Heterogênea (PRVFH), o Problema de Roteamento de Veículo com Entregas Fracionárias (PRVEF) e o PRV com coleta e entrega. A equipe de pesquisa LABIC-IC-UFF, que atua nessa área, possui expertise em PRV e suas variantes, além de sua aplicação em cidades inteligentes & sustentabilidade [Ochi 2021a, 2021b; Creating.City 2022; Subramanian 2012; Penna 2013; Coelho 2015; Haddad 2017]. Nesse contexto, as contribuições dos modelos de PRV servirão de base para o desenvolvimento do PCLE.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura sobre logística reversa do lixo eletrônico e sua gestão adequada; a seção 3 descreve o PCLE, com base em problemas de roteamento similares; a seção 4 propõe uma modelagem baseada em técnicas heurísticas, metaheurísticas e híbridas aplicáveis ao problema da coleta do lixo eletrônico; por fim, a última seção discute as conclusões e possíveis direções futuras para a pesquisa.

2. Literatura

Desde a década de 1960, o Problema de Roteamento de Veículos com Entrega e/ou Coleta tem sido amplamente estudado, encontrando aplicação em diversos setores como logística e serviços. Um exemplo disso é a gestão de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE). Embora o lixo eletrônico seja geralmente visto como um problema significativo na sociedade contemporânea, a reciclagem e o reuso desses resíduos, quando bem gerenciados, podem gerar benefícios econômicos e ambientais, incluindo lucro, redução de consumo de energia, diminuição da poluição e melhoria da imagem corporativa, reforçando a importância de práticas sustentáveis.

De acordo com [Sar e Ghadimi 2023], os REEE possuem um valor econômico significativo. Por exemplo, na Índia, o lixo eletrônico produzido em uma cidade pode conter até 65 mil dólares em materiais valiosos anualmente. Na Turquia, o potencial de recuperação a partir de resíduos metálicos de painéis solares chega a 35 milhões de dólares por ano. A China, reconhecendo o valor dos resíduos plásticos, importou 45,1% desses resíduos globalmente para reciclagem.

Esses resíduos contêm metais preciosos como cobre, ouro, prata e platina, e o tratamento adequado desses materiais reduz a necessidade de explorar novos recursos minerais, criando, ao mesmo tempo, novas oportunidades de emprego para uma mão de obra qualificada. Empresas e indústrias também podem se beneficiar da utilização de componentes e materiais reciclados, economizando em energia, produção e custos de transporte [Aquino et al 2021]. No entanto, até 2019, o Brasil carecia de informações e estatísticas oficiais sobre o volume gerado e coletado de resíduos eletroeletrônicos, segundo [Forti 2019]. A análise desses resíduos revela uma elevada toxicidade, com metais pesados e produtos químicos perigosos frequentemente presentes em sua composição. Em 2018, o Brasil produzia 1,5 Mt de lixo eletrônico por ano, número que aumentou em 40% até 2020.

[Grossman 2006] destaca que aproximadamente 70% dos metais pesados em lixiviados provêm de REEE descartados inadequadamente em lixões ou aterros. Sem o tratamento adequado, esses resíduos podem contaminar lençóis freáticos e terras agrícolas, afetando a saúde humana e elevando o risco de várias doenças [Kiddee 2014]. Para enfrentar esses desafios, o Brasil firmou, em 2019, o Acordo Setorial para a Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos, visando promover ações alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Porém, em países em desenvolvimento, a reciclagem de REEE enfrenta desafios como insuficiência de coleta, lacunas tecnológicas, exportações ilegais e falta de conscientização sobre os perigos ambientais e à saúde. No Brasil, esses desafios são exacerbados pela falta de um padrão legislativo nacional e a existência de diversas legislações estaduais e municipais [Demajorovic et al 2016].

A produção global de e-lixo é estimada em até 50 milhões de toneladas por ano, mas apenas 15% a 20% desse volume é reciclado adequadamente [Tzoraki e Lasithiotakis 2019]. Mesmo com políticas internacionais para restringir o comércio ilegal e a reciclagem informal, a situação permanece crítica, especialmente em países como o Brasil, que está entre os maiores produtores de lixo eletrônico no mundo [Forti et al 2020].

A pandemia de COVID-19 também impactou a gestão de resíduos, com um aumento significativo na geração de resíduos médicos. A logística reversa eficiente tornou-se essencial para lidar com esses resíduos perigosos de maneira segura e eficaz, utilizando novas tecnologias como drones e robôs para mitigar os riscos [Yu et al 2020]. No Brasil, os catadores de materiais recicláveis enfrentaram dificuldades adicionais durante a pandemia, expondo-se a riscos para manter a coleta de resíduos, fundamental para a reciclagem [Henrique e Mattos 2020].

Estudos sobre o roteamento de veículos "verdes" têm sido realizados desde 2006, buscando minimizar o consumo de energia e promover o uso de combustíveis alternativos [Lin et al 2014]. A gestão de resíduos é essencial para a proteção ambiental, e a implementação de Cidades Inteligentes, impulsionada pela *IoT*, pode otimizar a gestão de resíduos urbanos [Sharma et al 2020]. No entanto, o desenvolvimento de um ecossistema sustentável ainda enfrenta desafios como a segurança e a governança.

O crescimento do e-commerce também impacta a reciclagem de e-lixo, oferecendo uma alternativa econômica à coleta tradicional, embora ainda seja necessário mais estudo sobre sua aceitação [Zhang et al 2019]. A privacidade e a segurança dos dados são questões cruciais ao descartar dispositivos eletrônicos, especialmente em um cenário de aumento do consumo e do descarte de eletrônicos durante a pandemia [Kapoor et al 2021].

Nos estudos recentes, diversos pesquisadores têm abordado problemas análogos ao Problema de Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE) utilizando diferentes métodos e algoritmos. [Subramanian et al 2010] desenvolveram uma metaheurística paralela específica para o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega sob restrições de capacidade (PRVCES), enquanto [Ubeda et al 2011] propuseram um algoritmo heurístico voltado para a redução de emissões de CO₂ e economia de recursos em práticas logísticas verdes. [Subramanian et al 2011] também exploraram o PRVCES, utilizando um algoritmo *Branch-and-Cut* que garante o cumprimento das capacidades durante a rota por meio de restrições aplicadas de forma seletiva.

Nos anos subsequentes, outras abordagens inovadoras foram introduzidas. [Mar-Ortiz et al 2013] aplicaram um modelo de Programação Inteira Mista com um algoritmo GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) para a coleta de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), enquanto [Subramanian et al 2013] combinaram heurísticas baseadas em ILS e SP para variantes do PRVCES e problemas correlatos. [Silva et al 2015] propuseram o SplitILS, uma heurística *multi-start* iterada para o *Split Delivery Vehicle Routing Problem* (SDVRP), e [Nowakowski et al 2017] apresentaram um modelo para a coleta sob demanda de REEE usando uma frota heterogênea, combinando Algoritmo Genético e lógica *Fuzzy*.

Mais recentemente, estudos como os de [Haddad et al; Nowakowski et al 2018] analisaram algoritmos híbridos e de Inteligência Artificial para problemas relacionados ao PRVCES e à logística reversa de e-lixo. No ano seguinte, [Penna et al 2019] desenvolveram um algoritmo unificado para resolver uma ampla gama de problemas de roteamento de veículos com frota heterogênea, enquanto [Aquino et al 2021] focaram em metaheurísticas para otimizar a localização de pontos de coleta de REEE. Finalmente, pesquisas de [Kumar et al 2022; Govindan et al 2023] exploraram o uso de modelos estocásticos e a aplicação de tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (*IoT*) para o gerenciamento eficiente de resíduos eletrônicos e redes de cadeia de suprimentos circulares.

Colocamos à disposição dos interessados uma lista mais completa dos trabalhos da literatura no tema aqui proposto, juntamente com instâncias utilizadas e as soluções encontradas para viabilizar novas pesquisas sobre o tema, que pode ser acessada em: <https://github.com/Snfavila/PCLE>.

3. Descrição do PCLE baseado em clássicos de PRV

O *Vehicle Routing Problem* (VRP), também conhecido como Problema de Roteamento de Veículos (PRV), introduzido por Dantzig e Ramser em 1959, tornou-se um dos problemas mais estudados na área de Pesquisa Operacional, Otimização e Inteligência Computacional. A complexidade computacional inerente ao VRP, aliada às suas inúmeras aplicações em Logística Inteligente e Transportes, fez com que surgissem diversas variantes desse problema ao longo dos anos [Gendreau e Potvin 2010; Subramanian 2012; Penna 2013; Silva et al 2015; Coelho 2015; Haddad 2017]. Algumas dessas variantes se destacam por sua relevância para a pesquisa atual, como o Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH) [Penna 2013] e o Problema de Roteamento de Veículo com Entregas Fracionárias (PRVEF) [Silva et al 2015; Haddad 2018], que permite que a demanda de um cliente seja atendida por múltiplos veículos. Outra variação importante é o Problema de Roteamento de Veículo com Coleta e Entrega, que abrange diversas abordagens, incluindo o Problema de Roteamento de Veículo com Coleta e Entrega Simultânea (PRVCES), Coleta e Entrega Mista (PRVCEM) e o Problema do Caixeiro Viajante com Coleta e Entrega Mista (PCVCEM) [Subramanian 2012; Coelho 2015].

No contexto da coleta de resíduos, o Problema de Coleta de Lixo Eletrônico (PCLE) ou e-lixo envolve pontos de coleta onde a população deposita objetos descartáveis, como em lojas, locais designados pela comunidade ou instituições públicas. Esses resíduos são então transportados por uma frota heterogênea de veículos, que parte de uma garagem, visita os pontos de coleta e finalmente os leva aos destinos onde os materiais serão reciclados ou armazenados. Embora o PCLE compartilhe semelhanças com o problema de coleta de lixo orgânico, há características específicas que o distinguem, como o tamanho dos objetos a serem coletados, que muitas vezes são significativamente maiores do que no caso do lixo orgânico. Exemplos de e-lixo incluem geladeiras, televisores, computadores e monitores, que podem demandar múltiplas viagens de veículos para garantir a coleta completa em um determinado local de origem.

A descrição formal do Problema de Coleta de Lixo Eletrônico (*E-Waste Collection Problem*) em termos de um grafo é definido do seguinte modo: considere um grafo dirigido $G = (V, A)$, onde V é o conjunto de nós representando os pontos de coleta (clientes) e os postos de reciclagem (depósitos). $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_{n+d}\}$, onde v_0 representa o depósito inicial, $v_1, v_2, \dots, v_n$ representam os clientes, e $v_{n+1}, v_{n+2}, \dots, v_{n+d}$ representam os postos de reciclagem potenciais. A é o conjunto de arcos que conectam os nós, representando as possíveis rotas entre os pontos de coleta e os depósitos. Cada arco $(i, j) \in A$ tem um custo c_{ij} , que pode representar a distância ou outro fator relevante. A frota heterogênea disponível é composta por veículos com diferentes capacidades Q_k , onde $k \in K$ e K é o conjunto de veículos disponíveis. Cada veículo k tem uma capacidade Q_k e um custo de operação f_k . Em relação às restrições, temos:

1. Capacidade do Veículo: a soma das demandas dos clientes em uma rota não pode exceder a capacidade do veículo k .

$$\sum_{v_i \in R} d_j \leq Q_k, \quad \text{para todo veículo } k \text{ e rota } R \quad (1.1)$$

Onde d_j é a demanda do cliente v_j .

2. Capacidade dos Postos de Reciclagem: a quantidade total de lixo eletrônico entregue em um posto de reciclagem v_j não pode exceder sua capacidade C_j .

$$\sum_{v_i \in R_j} d_j \leq C_j, \quad \text{para todo posto de reciclagem } v_j \quad (2.1)$$

Onde R_j é o conjunto de rotas que terminam no posto v_j .

3. Abertura Limitada de Postos: apenas p postos de reciclagem podem ser abertos, onde p é um número pré-definido.

$$\sum_{j=n+1}^{n+d} y_j \leq p, \text{ onde } y_j = 1 \text{ se o posto } j \text{ for aberto, caso contrário } y_j = 0 \quad (3.1)$$

4. Rotas dos Veículos: cada veículo deve partir de um depósito e retornar a um depósito após servir os clientes atribuídos.
5. Custos Fixos de Abertura de Postos: o problema das p-medianas capacitado com custos fixos é utilizado para determinar a localização dos postos de reciclagem a serem abertos, de modo a minimizar o custo total que inclui custos fixos de abertura e custos variáveis de transporte.

O objetivo é minimizar o custo total de operação, que inclui os custos de transporte, os custos fixos de abertura dos postos de reciclagem e os custos de operação dos veículos.

Além dos aspectos mencionados, o problema de coleta de lixo eletrônico envolve desafios adicionais relacionados à regulamentação e à logística reversa. A gestão de e-lixo é fortemente influenciada por políticas ambientais rigorosas, que variam conforme a região e exigem o cumprimento de normas específicas para o descarte e a reciclagem de eletrônicos. Isso implica a necessidade de uma rede logística eficiente que minimize os custos e impactos ambientais, ao mesmo tempo em que assegura a conformidade legal. A logística reversa, nesse contexto, se destaca como uma abordagem essencial para a recuperação de materiais valiosos e a redução de resíduos destinados a aterros sanitários. Estudos indicam que a eficiência na coleta e na reciclagem de e-lixo pode ter um impacto significativo tanto na sustentabilidade ambiental quanto na economia circular, promovendo o reaproveitamento de recursos e a redução da exploração de matérias-primas.

4. Modelo Proposto para o PCLE

O algoritmo utilizado nesta pesquisa é uma adaptação para o PCLE do algoritmo denominado SplitILS proposto por [Silva et al 2015], que é uma heurística *multi-start* aplicada ao PRVEF. No algoritmo, a heurística executa I_{max} iterações e em cada uma delas uma solução inicial é gerada utilizando um procedimento construtivo baseado em inserção, que busca criar rotas viáveis de maneira eficiente. O foco é garantir que todas as demandas dos clientes sejam atendidas enquanto respeita-se a capacidade dos veículos, estabelecendo uma base sólida para a aplicação de técnicas de otimização subsequentes no ILS.

Para o Problema de Coleta do Lixo Eletrônico, implementamos uma frota heterogênea. Isso significa que temos veículos com diferentes capacidades, custos e características. Assim, o problema foi estendido para ser tratado como um Problema das Mochilas Múltiplas (*Multiple Knapsack Problem*), em que é necessário decidir a melhor combinação de itens (demandas) a serem distribuídos entre vários veículos (mochilas), garantindo que cada demanda seja completamente atendida e os custos totais sejam minimizados. Essa abordagem permite uma modelagem mais precisa e eficiente do problema no contexto de frotas com capacidades variadas. Ao término da coleta, os veículos devem transportar o lixo eletrônico até os postos de reciclagem, que podem ou não ser abertos.

A partir desse ponto, uma abordagem híbrida é empregada como estratégia para armazenar rotas otimizadas durante a execução do algoritmo, seguida de um procedimento exato para selecionar o subconjunto de rotas com menor custo. Esse processo está relacionado ao Problema das p-Mediana, um problema clássico de localização. Para resolver essa etapa de forma eficiente, foi desenvolvido o procedimento *solvePCLE* utilizando as bibliotecas do *CPLEX*, que são ferramentas robustas para otimização matemática. Com isso, o problema de coleta de lixo eletrônico foi modelado como um Problema de Roteamento de Veículos com Coleta Fracionária e Frota Heterogênea com Múltiplos Depósitos (PRVCF-FH-MD), permitindo uma solução mais precisa e eficiente para a escolha das melhores rotas e localizações dos postos de reciclagem.

A seguir, apresentamos os algoritmos desenvolvidos e implementados ao longo do projeto, que desempenham um papel crucial na resolução do problema abordado.

Algoritmo 1: SplitILS_sPCLE

```

1. Procedimento SplitILS_sPCLE( $I_{Max}$ ,  $I_{ILS}$ )
2.  $f^* \leftarrow \infty$ ;
3. para  $i \leftarrow 1, \dots, I_{Max}$  faça
4.    $s \leftarrow \text{GSolInicial}()$ ;
5.    $s' \leftarrow s$ ;
6.    $iterILS \leftarrow 0$ ;
7.   enquanto  $iterILS < I_{ILS}$  faça
8.      $s \leftarrow \text{RVND}(s)$ ;
9.     se  $\text{PRVCF-FH}$  então
10.       $s \leftarrow \text{EmptyRoutes}(s)$ ;
11.     fim se
12.     se  $f(s) < f(s')$  então
13.        $s' \leftarrow s$ ;
14.        $iterILS \leftarrow 0$ ;
15.     fim se
16.      $s \leftarrow \text{Perturba}(s)$ ;
17.      $iterILS \leftarrow S \cdot iterILS + 1$ ;
18.   fim enquanto
19.   se  $f(s') < f^*$  então
20.      $s^* \leftarrow s'$ ;
21.      $f^* \leftarrow f(s')$ ;
22.   fim se
23. fim para
24. retorne  $s^*$ ;
25.  $s^{**} \leftarrow \text{solvePCLE}(s^*)$ ;
26. retorne  $s^{**}$ ;
27. fim

```

O algoritmo 1 realiza um número definido de iterações, denotado como I_{max} (linhas 3 a 23). Em cada iteração, ele começa gerando uma solução inicial utilizando um método construtivo baseado em inserções (linha 4). Em seguida, o laço principal do *Iterated Local Search* (ILS) (linhas 7 a 18) continua até que um número determinado de iterações sem melhorias, chamado I_{ILS} , seja alcançado. Durante cada iteração, o algoritmo tenta aperfeiçoar a solução atual utilizando o procedimento RVND na fase de busca local (linha 8). Se a frota é limitada e o número de rotas na solução ótima local excede o número mínimo de veículos necessários, a rota com menor carga é esvaziada através do procedimento *EmptyRoutes*, (linhas 9 a 11). Quando uma solução melhor é identificada, o contador de iterações é resetado (linhas 12 a 15). A solução corrente é então modificada levemente (linha 16). Ao final do processo, a melhor solução de rotas obtida pela heurística ILS é devolvida (linha 24), que pode ser observada com mais detalhes em [Silva et al 2015]. Essa solução otimiza somente a parte de roteamento do problema. A seguir, o procedimento *solvePCLE* é aplicado a essa solução para determinar a melhor configuração de abertura dos postos de reciclagem, utilizando a solução de rotas como base (linha 25). No término do processo, é retornada a solução final, que compreende tanto a rota otimizada quanto a localização dos postos de reciclagem.

Algoritmo 2: solvePCLE

```

1. Procedimento solvePCLE( $s^*$ )
2. inicia o ambiente CPLEX;
3. constrói o modelo de otimização:
4.   minimiza os custos de abertura de postos de reciclagem e transporte;
5.   adiciona restrições de capacidade, cobertura, e unicidade de atribuição;
6. define o tempo limite do CPLEX;
7. resolve o modelo;
8. se uma solução ótima for encontrada então
9.   imprime a solução;
10. senão
11.   imprime o status da solução;
12. fim se;
13. retorne ( $s^{**}$ );
14. encerre o ambiente CPLEX;
15. fim

```

O Algoritmo 2 inicia o procedimento *solvePCLE*, recebendo uma solução inicial s^* , que serve como ponto de partida para o modelo de otimização (linha 1). Em seguida, o ambiente CPLEX é iniciado para preparar a modelagem e a solução do problema (linha 2). O modelo de otimização é então construído com a definição das variáveis de decisão, da função objetivo, que

visa minimizar os custos de abertura dos postos de reciclagem e transporte, e das restrições necessárias, como capacidade, cobertura e unicidade de atribuição (linhas 3-5). Posteriormente, o tempo-limite para a resolução do modelo é configurado (linha 6), e o *CPLEX* é utilizado para buscar a melhor solução possível dentro das restrições definidas (linha 7). Caso o *CPLEX* encontre uma solução ótima, os detalhes dessa solução, como os postos abertos e as rotas de transporte, são impressos. Se não for possível encontrar uma solução ótima, o status do processo é impresso, indicando o motivo da falha (linhas 8-11). O procedimento termina retornando à solução s^{**} , que pode ser uma melhoria de s^* , e encerrando o ambiente *CPLEX* para liberar recursos (linhas 12-15).

A fim de tornar o modelo implementado mais próximo da realidade, procuramos realizar uma pesquisa junto a empresas desse setor. O total de empresas que aceitaram participar da pesquisa, até o presente momento, foram três. A seguir, listamos as respostas ao formulário:

Tabela 1 – Resumo das Respostas de Empresas de Coleta de Lixo Eletrônico

Seção	Detalhes
Objetivo do Relatório	Avaliar as operações de Empresas de Coleta de Lixo Eletrônico, compreender suas atividades, identificar desafios, práticas sustentáveis e oportunidades de melhoria através de métodos computacionais de otimização.
Participantes	- Empresa A: Cachoeirinha, RS, desde 2001 - Empresa B: São Paulo, SP, desde 2015 - Empresa C: Rio de Janeiro, RJ, desde 2022
Informações Gerais	- Localização, tempo de operação, serviços oferecidos e informações de contato fornecidos com precisão.
Operações de Coleta	- Variadas abordagens na elaboração de rotas de coleta. - Desafios na otimização de rotas. - Organização do processo de coleta, veículos utilizados, áreas atendidas e gestão da frota abordados de maneira abrangente. - Diversidade de desafios, como variabilidade na quantidade e tipo de lixo eletrônico.
Desafios e Obstáculos	- Questões operacionais, regulatórias e logísticas destacadas pela complexidade da gestão do lixo eletrônico.
Sustentabilidade e Eficiência	- Práticas sustentáveis enfatizadas, promovendo a reciclagem e implementando medidas para eficiência e sustentabilidade.
Colaboração com Pesquisa Acadêmica	- Receptividade variada à colaboração com pesquisadores acadêmicos, com interesse em contribuir para melhorias nas operações.
Conclusões	- Visão aprofundada das operações das empresas participantes. - Áreas de excelência e desafios destacados. - Informações essenciais para futuras pesquisas acadêmicas e colaborações práticas. - Importância de melhor gestão dos resíduos e uso de métodos de otimização para eficiência e sustentabilidade.

5. Resultados

Os resultados obtidos nessa primeira versão do algoritmo para o PCLE demonstram que o uso dessa técnica é promissor e eficaz para a resolução de problemas com as instâncias testadas. Os conjuntos de dados contêm de 10 a 150 pontos de coleta do lixo eletrônico. Embora as respostas tenham sido positivas, ainda há espaço para melhorias na implementação, especialmente para aumentar a escalabilidade e possibilitar comparações com outros algoritmos. A seguir, apresentamos os tempos computacionais obtidos durante os testes realizados:

Tabela 2 – Resultados dos Testes de Instâncias do Algoritmo de Otimização para o PCLE

Instância	Número de Nós	Custo Inicial	Custo Otimizado	Tempo de Execução (s)	Melhorias (%)
I01	10	8.238,03	5.482,47	0,06	34,44%
I02	20	5.575,99	2.493,8	0,28	55,27%
I03	50	7.326	5.949,88	14,87	18,78%
I04	50	10.378,53	5.541,12	18,79	46,60%

I05	75	7.399,95	4.275,79	104,89	42,21%
I06	100	16.363,65	13.019,16	145,18	20,43%
I07	120	22.460,98	17.990,7	908,38	19,90%
I08	150	11.998,18	8.226,86	1.781,19	31,43%

Descrição das Colunas:

1. Instância: Identificador único para cada teste de instância do problema.
2. Número de Nós: Quantidade de pontos de coleta do e-lixo.
3. Custo Inicial: Custo total antes da aplicação do algoritmo de otimização.
4. Custo Otimizado: Custo total após a aplicação do algoritmo de otimização.
5. Tempo de Execução (s): Tempo necessário para a execução do algoritmo.
6. Melhorias (%): Percentual de melhoria no custo total após a otimização.

Atualmente, estamos expandindo esses testes para que a formulação proposta seja avaliada em instâncias de maior escala. Resultados preliminares indicam um desempenho promissor do modelo de algoritmo híbrido, que combina as metaheurísticas ILS (*Iterated Local Search*) e RNVD (*Randomized Variable Neighborhood Descent*) com o solver CPLEX. Conforme previsto, o aumento na dimensão dos dados de entrada levou a um rápido crescimento das matrizes associadas ao modelo, especialmente com o incremento do número de pontos de coleta de lixo eletrônico e o volume de objetos coletados. No entanto, a técnica de hibridização, utilizando metaheurísticas eficientes associadas a modelos matemáticos, resultou em soluções de alta qualidade dentro de tempos computacionais viáveis.

6. Conclusões

Este estudo aborda o Problema de Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE) como um desafio significativo nas áreas de logística e transporte. Melhorar a eficiência na coleta desses resíduos é essencial para atingir as metas de sustentabilidade das cidades inteligentes. A coleta e a entrega em locais de reciclagem ou depósitos são componentes fundamentais da logística reversa, desempenhando um papel crucial para a sociedade ao reduzir os impactos ambientais decorrentes do crescente acúmulo de lixo eletrônico.

Eventos climáticos extremos, como as recentes inundações no Rio Grande do Sul e outros desastres ao redor do mundo, destacam a urgência de uma gestão eficiente dos resíduos eletrônicos. O acúmulo de e-lixo pode agravar problemas ambientais, como a contaminação do solo e da água, aumentando a vulnerabilidade das regiões afetadas por eventos climáticos severos. Durante esta pesquisa, identificamos diversos benefícios de uma gestão adequada desses resíduos, incluindo a viabilidade e a otimização das rotas, a redução de custos e dos danos ao meio ambiente e à saúde, além de assegurar ao consumidor o direito de devolução e troca de mercadorias. Dessa forma, uma gestão eficaz do e-lixo não apenas mitiga os impactos ambientais locais, mas também contribui para a resiliência global diante das mudanças climáticas e de eventos extremos cada vez mais frequentes.

Diante dessas questões, propomos a implementação de um algoritmo denominado PRVCF-FH-MD para resolver o PCLE. Utilizamos técnicas de otimização desenvolvidas pela equipe do LABIC IC/UFF em Inteligência Computacional, destacando o uso eficaz de algoritmos híbridos que combinam diversas metaheurísticas e métodos exatos para abordar as variantes mais complexas do PCLE. Este trabalho busca aprimorar as associações de transporte otimizadas, desenvolvendo rotas mais eficientes para a coleta de resíduos eletrônicos. Consideramos a localização estratégica dos pontos de coleta e entrega, bem como o roteamento otimizado de uma frota heterogênea de veículos que inicia e finaliza suas operações em uma garagem central.

Para futuros trabalhos, planejamos aprimorar a implementação do algoritmo visando aumentar sua escalabilidade e desempenho, permitindo uma comparação mais robusta com outras estruturas existentes. Essas melhorias permitirão ampliar o alcance da solução proposta e fortalecer sua aplicabilidade em diferentes contextos urbanos.

Referências

ABDI (2013). Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos – Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. ed. Inventta. ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial.

Aquino, I. R. B. de et al (2021). The Proposition of a Mathematical Model for the Location of Electrical and Electronic Waste Collection Points. *Sustainability*. vol. 13, nº 1, 2071-1050.

Bo, Y.; Wang, Y. and Wan, Z. (2019). Optimizing the WEEE Recovery Network Associated with Environmental Protection Awareness and Government Subsidy by Nonlinear Mixed Integer Programming. *Journal of Advanced Transportation*, [s. l.], p. 1-21.

Coelho, I. M. (2015). Hybrid and Parallel Algorithms for Single and Multi-Objective Routing Problems. Tese de Doutorado, orientador: Luiz Satoru Ochi, IC-UFF - Brasil.

Costa, Leonardo R. da (2009). O Problema de Localização Capacitado em Dois Níveis e sua Aplicação ao Planejamento de Logística Reversa. Tese de Doutorado, COPPE, Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.

Creating.City (2020). Site sobre atividades da equipe do LabIC IC UFF no tema: Cidades e Regiões Inteligentes, Sustentáveis e Digitais. Web page: <https://creating.city/>. Acessado: 2021-03-18.

Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1):8091.

Demajorovic, J.; Augusto, E. E. F. and Souza, M. T. S. (2016). Reverse Logistics of E-Waste in Developing Countries: Challenges and Prospects for the Brazilian Model. *Ambient. soc.* vol. 19, n. 2, São Paulo.

Dias, P. et al (2018). Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. *Journal of Cleaner Production*. 174, 7-16.

Forti, V. (2019). O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais, Panorama setorial da Internet, n. 4. Web page. <https://cetic.br/media/docs/publicacoes/6/20191217174403/panorama-setorial-xi-4-lixo-eletronico-atualizado.pdf>. Acessado: 2021-05-01.

Gendreau, M. and Potvin, JY. (2010). Handbook of Metaheuristics. 2. ed. Boston: *Springer*. vol. 146.

Grossman, E. (2006). High Tech Trash: Digital Devices, Hidden Toxics, and Human Health. Island Press, Washington, DC, United States.

Haddad, M. N. (2017). An Efficient Heuristic for One-To-One Pickup and Delivery Problems. Tese de Doutorado, orientador: Luiz Satoru Ochi, IC UFF, Niterói, Rio de Janeiro - Brasil.

Haddad, M. N.; Ochi, L. Satoru et al (2018). Large Neighborhood-Based Metaheuristic and Branch-and-Price for the Pickup and Delivery Problem with Split Loads. *European Journal of Operational Research*. vol. 270.

Henrique, R. L. da S. and Mattos, U. A. de O. (2020). Contexto Socioambiental das Cooperativas de Catadores do Rio de Janeiro e os Impactos da COVID 19. *Revista Internacional de Ciências*. Rio de Janeiro, vol. 10, 3, 32-49.

Islam, Md T. and Huda, N. (2018). Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*. vol. 137, 48-75.

Kapoor, N.; Sulke, P. and Badiye, A. (2021). E-waste forensics: An overview. *Forensic Science International: Animals and Environments*. vol. 1, 100034, 2666-9374.

Kiddee, P. et al (2014). Field investigation of the quality of fresh and aged leachates from selected landfills receiving e-waste in an arid climate. *Waste Management*. 34, 2292-2304.

Lin, C. et al (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*. vol. 41, 4, 1118-1138.

Mar-Ortiz, J.; González-Velarde, J.L. and Adenso-Díaz, B. (2013). Designing routes for WEEE collection: the vehicle routing problem with split loads and date windows. *J Heuristics* 19, 103-127.

Nowakowski, P. (2017). A proposal to improve e-waste collection efficiency in urban mining: Container loading and vehicle routing problems - A case study of Poland. *Waste Management*. vol. 60, p. 494-504.

Nowakowski, P.; Król, A. and Mrówczyńska, B. (2017). Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimization. *Waste Management*. vol. 69, p. 377-392.

Nowakowski, P.; Szwarc, K. and Boryczka, U. (2018). Vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand supported by artificial intelligence algorithms. *Transportation Research, Transport and Environment*. vol. 63, 1-22.

Ochi, L. S. (2021a). Smart Cities & Inteligência Computacional: uma parceria de sucesso! (lecture), Universidade Federal Fluminense, Niterói – Rio de Janeiro. Web page. <https://www.youtube.com/watch?v=rReON8X4yng&t=161s/>. Acessado: 2021-07-03.

Ochi, L. S. (2021b). [EI/PGC 2021] Cidades Inteligentes & Sustentáveis (lecture), Universidade Federal Fluminense, Niterói – Rio de Janeiro. Web page. <https://www.youtube.com/watch?v=Z4AXfsrQLrs/>. Acessado: 2021-10-03.

Penna, P. H. V. (2013). Um Algoritmo Unificado para uma Classe de Problemas de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea. Tese de Doutorado, orientador: Luiz Satoru Ochi, Instituto de Computação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro - Brasil.

Penna, P. H. V.; Ochi, L. Satoru et al (2019). A hybrid heuristic for a broad class of vehicle routing problems with heterogeneous fleet. *Ann Oper Res* 273, 5-74.

Popova, Y. and Sproge, I. (2021). Decision-Making within Smart City: Waste Sorting, *Sustainability*. vol. 13.

Rachih, H.; Mhada, F. Z. and Chiheb, R. (2019). Meta-heuristics for reverse logistics: a literature review and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*. vol. 127, 45-62.

Reddy, K. N.; Kumar, A. and Ballantyne, E. E. F. (2019). A three-phase heuristic approach for reverse logistics network design incorporating carbon footprint. *International Journal of Production Research*. vol. 57, 19, 6090-6114.

Sharma, M. et al (2020). Internet of Things (IoT) adoption barriers of smart cities' waste management: An Indian context. *Journal of Cleaner Production*. vol. 270, p. 122047.

Silva, M. Melo.; Subramanian, A. and Ochi, L. Satoru. (2015). An Iterated Local Search heuristic for the Split Delivery Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*. vol. 53, 234-249.

Singhal, D.; Tripathy, S. and Jena, S. K. (2020). Remanufacturing for the circular economy: Study and evaluation of critical factors. *Resources, Conservation and Recycling*. vol. 156, 104681.

Sousa Matos, M.; Frota, Y. and Ochi, L. Satoru (2018). Green Vehicle Routing and Scheduling Problem with Split Delivery. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. vol. 69, 13-20.

Subramanian, A. (2012). Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problems. Tese de Doutorado, orientador: Luiz Satoru Ochi, IC UFF, Rio de Janeiro - Brasil.

Subramanian, A.; Ochi, L. Satoru et al (2010). A parallel heuristic for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. *Computers & Operations Research*. vol. 37, 11, 1899-1911.

Subramanian, A.; Ochi, L. Satoru et al (2011). "Branch-and-cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery". *Oper. Res. Lett.* vol. 39, 338-341.

Subramanian, A.; Uchoa, E. and Ochi, L. Satoru (2013). A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*. vol.40, 2519-2531.

Ubeda, S.; Arcelus, F. and Faulin, J. (2011). Green logistics at eroski: A case study. *International Journal of Production Economics*. vol. 131, 1, 44-51.

Yu, H. et al (2020). Reverse Logistics Network Design for Effective Management of Medical Waste in Epidemic Outbreaks: Insights from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. vol. 17, 5, 1660-4601.

Zhang, B. et al (2019). Motivation and challenges for e-commerce in e-waste recycling under "Big data" context: A perspective from household willingness in China. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 144, 436-444.