

Sobre um Segmento de Logística Reversa em Cidades Inteligentes: o Problema da Coleta do Lixo Eletrônico

Silvana Nazaré de Freitas Avila¹, Luiz Satoru Ochi¹, Simone de Lima Martins¹

¹Instituto de Computação & Laboratório de Inteligência Computacional/LabIC – UFF

Niterói – RJ – Brasil

silvanaavila@id.uff.br, satoru@ic.uff.br, simone@ic.uff.br

Abstract. *The e-waste is one of the socio-environmental problems that has drawn the most attention from society due to its growing volume, in addition to inadequate disposal. Thus, it is necessary that the Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) have an adequate management that minimizes the problem of reverse logistics in its collection and the environmental impacts. As this is an extremely important topic in the context of smart cities, the objective of this work is to present a partial literature review and a new mathematical formulation for the Electronic Waste Collection Problem (EWCP), describing it as an Integer Linear Programming problem based on other similar models in the literature, some of which have already been extensively explored.*

Keywords: *smart cities, electronic waste collection, reverse logistics, computational intelligence*

Resumo. *O lixo eletrônico (e-lixo) é um dos problemas socioambientais que mais tem chamado a atenção da sociedade devido ao seu crescente volume, somado ao descarte inadequado. Desse modo, faz-se necessário que os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) tenham uma gestão adequada que minimize o problema de logística reversa na sua coleta e os impactos ambientais. Sendo esse um tema de extrema importância no contexto de cidades inteligentes, o objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão parcial da literatura e uma nova formulação matemática para o problema de Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE), descrevendo-o como um problema de Programação Linear Inteira com base em outros modelos semelhantes da literatura, alguns já bastante explorados.*

Palavras-chave: *cidades inteligentes, coleta lixo eletrônico, logística reversa, inteligência computacional.*

1.Introdução

Esta pesquisa foi motivada devido aos altos índices no consumo dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), o que gera cada vez mais resíduos, ou seja, o lixo eletrônico. Esse fato nos leva a refletir sobre a finitude de matérias-primas e sobre uma crescente preocupação com o meio ambiente. Desse modo, conscientizar toda a população sobre a gestão apropriada desses materiais evita o descarte inadequado, possibilitando o reaproveitamento, que minimiza os impactos ambientais. Essa é uma forma de se economizar energia, reduzir os custos de produção e melhorar o marketing social do empreendimento, conforme [Rachih et al 2018]. Nesse sentido, nosso objetivo é tratar especificamente da *logística reversa relacionada ao problema da coleta do lixo eletrônico*, propondo uma formulação matemática em Programação Linear Inteira (PLI), como forma de apresentar uma solução para o problema. Esse seguimento é apontado como sendo de extrema relevância socioambiental, e existem várias aplicações no mundo real essenciais na implementação das cidades inteligentes e sustentáveis.

Segundo [Rachih et al 2018], a logística reversa é essencialmente composta por sete áreas: “problema de roteamento dos veículos de coleta dos resíduos, desenho da rede logística, localização e alocação, planejamento da produção, montagem e desmontagem (manutenção, remanufatura, reciclagem ou descarte), gerenciamento de devoluções e gestão de estoque”. [Islam e Huda 2018] explicam que o gerenciamento de devoluções

de REEE envolve vários fatores com maior grau de incertezas, como qualidade, quantidade e tempo. Sendo assim, a logística reversa abrange muitos problemas que necessitam urgentemente da atenção de todos. Um exemplo disso é a coleta do e-lixo, que engloba o transporte/ quantidade de veículos, distância percorrida/ rota e a capacidade transportada nos caminhões.

O problema de coleta do lixo eletrônico ou dos REEE está ligado a um tema maior, que é o problema de roteamento de veículos (PRV). Num contexto um pouco mais especializado, ele está enquadrado na coleta de lixo, no qual um dos problemas mais pesquisados é o de coleta de lixo urbano, que conforme [Costa 2009] é para onde se destina qualquer produto descartado, seja ele de qualquer natureza. Até hoje, ainda há muitas lacunas nesse seguimento do lixo urbano, e isso propicia mais pesquisas que possam colaborar, apontando alternativas e tendências que busquem uma solução mais sustentável e ao mesmo tempo otimizada, minimizando custos. Sendo assim, a motivação para se explorar e aprofundar conhecimentos nessa área é crescente, embora existam outras questões socioambientais igualmente importantes, como o acúmulo de rejeitos em lixões, que no Brasil continuam sem o tratamento adequado, causando contaminação ambiental – solo e recursos hídricos –, além de inúmeros danos à saúde da população. A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial divide os EEE em quatro grandes categorias: linha branca (geladeiras e freezers, fogões, máquinas de lavar etc.); linha marrom (tubo, plasma, monitores LCD e LED, televisores etc.); linha azul (misturadores, liquidificadores, ferros elétricos etc.); linha verde (computadores desktop e laptops, acessórios de computador, tablets e celulares), conforme [Aquino et al 2021]. A partir do descarte de qualquer tipo de material desses equipamentos é produzido o lixo eletrônico, também conhecido como *WEEE* ou *e-waste*.

Um dos fatores essenciais a ser tratado no problema de logística reversa do *e-lixo* é a coleta. Entretanto, a falta de conscientização do consumidor e seu conhecimento limitado sobre o benefício de devolver o produto são um obstáculo para a estratégia de coleta. Portanto, os consumidores devem ser incentivados a devolver seus bens usados ou danificados, além de estar bem informados sobre os pontos de coleta, tornando o processo mais viável e lucrativo. [Singhal et al 2020]. Muitas vezes, o descarte de produtos eletroeletrônicos se dá antes mesmo do final de sua vida útil, e isso é estimulado pelo avanço tecnológico ou pelo interesse em aumentar o lucro com novas vendas, proporcionado pela diminuição intencional da durabilidade das mercadorias, caracterizando a obsolescência programada. Isso desencadeia um aumento expressivo na produção mundial desses resíduos.

Nesse contexto, a Indústria 4.0 insere novas tecnologias por meio da Internet das Coisas (IoT) e novos desafios surgem, pois estima-se que futuramente bilhões de dispositivos eletrônicos estarão conectados em toda parte. Isso aumentará ainda mais o volume de REEE, sendo extremamente importante a gestão adequada desses resíduos para que haja o reaproveitamento de recursos naturais, além de evitar a contaminação do meio ambiente com substâncias tóxicas presentes no *e-lixo*. Sobre esse aspecto, a logística verde tem um papel fundamental, pois é a partir dela que, segundo [Ubeda et al 2011], observa-se como as empresas podem ter efeitos ambientais positivos, realizando algumas mudanças operacionais em seu sistema logístico. Para que isso aconteça, é necessário explorar formas de alcançar práticas logísticas ambientalmente sustentáveis, determinando estratégias consideradas mais econômicas para gerenciar e responder às questões ambientais na logística. Por outro lado, todos esses objetos interconectados

facilitam a comunicação, beneficiando processos de automação em diversas atividades. Além disso, muitas aplicações de Cidades Inteligentes necessitam dessa interconexão; como exemplo, podemos citar o uso de sensores que determinem a quantidade de lixo em um *container*. As informações contidas nesse sistema podem oferecer rotas mais otimizadas que possibilitem a economia com combustíveis, custos e colaborem com uma menor emissão de gases.

Diante disso, a abordagem ao problema de acúmulo de REEE será tratado aqui especificamente como Problema da Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE), similar a problemas clássicos da literatura, como o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) e suas variantes. Esta pesquisa engloba a comparação do PCLE com do PRV semelhantes incluindo, por exemplo, 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 possui diversos pesquisadores atuando no tema PRV e suas variantes, bem como sua interação com *smart and digital cities* [Ochi 2021a, 2021b; Creating.City 2022; Subramanian 2012; Penna 2013; Coelho 2015; Haddad 2017]. Nesse contexto, um bom direcionamento é adaptar as boas contribuições dos modelos de PRV para o nosso problema PCLE.

O artigo foi estruturado conforme as seguintes seções: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os problemas relacionados à logística reversa do lixo eletrônico (REEE) e uma gestão adequada; a seção 3 descreve o PCLE, com base em problemas de roteamento semelhantes encontrados na literatura; a seção 4 apresenta uma formulação matemática baseada em Programação Linear Inteira para o Problema de Coleta do lixo eletrônico; por fim, na última seção, são descritos a conclusão e os trabalhos futuros que agreguem mais resultado à pesquisa.

2.Literatura

O Problema de Roteamento de Veículos com Entrega e/ou Coleta vem sendo estudado desde a década de 1960 e aplica-se a diversos contextos, como o da logística e serviços, incluindo o Problema da coleta de *Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos* (REEE). Embora o lixo eletrônico possa parecer apenas um grande problema para a sociedade contemporânea, havendo o descarte consciente, a gestão adequada da coleta até a sua reciclagem ou reuso pode gerar lucro, redução de energia, menores índices da poluição, diminuição dos impactos ambientais e melhora no marketing de empresas, o que sinaliza para uma prioridade em práticas sustentáveis.

Nos REEE encontram-se diversos tipos de metais, como cobre, ouro, prata, paládio, platina e outros considerados preciosos. O tratamento adequado desses metais reduz consideravelmente a necessidade de exploração de mais recursos minerais. Como consequência disso, novas oportunidades de emprego podem ser criadas com uma mão de obra qualificada. Além disso, os produtos retornados fornecem componentes e materiais que podem ter menor custo, gerar economia de energia, produção e custos de transporte, beneficiando empresas e indústrias [Aquino et al 2021]. De acordo com [Forti 2019], o Brasil ainda não possui informações e estatísticas oficiais sobre o volume gerado de resíduos de produtos eletroeletrônicos nem sobre o volume coletado e se são destinados corretamente. A análise dos resíduos encontrados no e-lixo demonstra uma elevada toxicidade. Além disso, “entre os materiais perigosos comumente encontrados no lixo eletrônico, destacam-se metais pesados (como mercúrio, chumbo e cádmio) e produtos

químicos (como clorofluorcarbonetos – CFCs – ou vários retardadores de chama)”. Ademais, estudos realizados em 2018 afirmam que, do volume de produtos eletroeletrônicos colocados no mercado e da vida útil de cada item, o Brasil produz 1,5 Mt de lixo eletrônico por ano.

Segundo [Grossman 2006], aproximadamente 70% dos metais pesados detectados em lixiviados (chorume) são provenientes do descarte de REEE em lixões ou aterros que recebem resíduos sólidos de origens diversas (doméstico, comercial, hospitalar e outros). [Kiddee 2014] afirma que esses resíduos, sem tratamento adequado, liberam substâncias que em contato com o solo podem causar a contaminação de lençóis freáticos (água potável) e de terras agrícolas nas proximidades. Consequentemente, o alimento cultivado nessas áreas também será exposto a elementos tóxicos (metais pesados e semimetais) que, quando ingeridos pelos seres humanos, causam mal à saúde, que se estende durante toda a vida. Portanto, a alta toxicidade dessas substâncias eleva o risco de se desenvolver várias doenças, como Alzheimer, hipertensão, descalcificação óssea, lesão renal, enfisema pulmonar, deformação fetal, câncer, lesões no fígado, anemia, lesões cerebrais, danos ao coração, entre outras. [ABDI 2013].

A fim de tornar a logística reversa operacional, no Brasil, foi assinado, em 31 de outubro de 2019, o Acordo Setorial para Implantação do Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes, tendo seu extrato publicado no Diário Oficial da União em 19 de novembro de 2019. Com base nesse acordo, os integrantes da cadeia produtiva de eletroeletrônicos domésticos assumem o compromisso de promover ações para atender a PNRS. Embora os países em desenvolvimento estejam frequentemente envolvidos em algumas fases do processo de reciclagem, eles não contribuem para a criação de conhecimento nessa área. No Brasil, por exemplo, a reciclagem tem como função principal desmontar, separar e triturar componentes complexos ou materiais complexos (placas de circuito impresso, discos rígidos, memórias, processadores e refrigeradores), sendo posteriormente enviados ao exterior para a reciclagem, o que concentra o conhecimento a apenas alguns países. [Dias et al 2018] afirmam que a situação no Brasil é crítica, devido ao aumento de REEE e ao sistema de reciclagem ineficiente.

Planejar a localização dos centros de coleta e das estações de tratamento é um fator importante a ser considerado, pois isso motiva o cliente a devolver o equipamento. Portanto, uma localização adequada irá proporcionar redução nos custos operacionais, minimizando a rota percorrida pelos veículos de coleta. Além disso, deve-se selecionar o tipo e número de veículos adequados para maximizar o uso do compartimento de carga do veículo. [Nowakowski 2017] destaca ainda que isso pode reduzir custos com o número de remessas. Parte da coleta de REEE possui alto valor de reciclagem devido à presença de metais preciosos nos componentes, o que aumenta o preço por volume. Embora a coleta seja uma tarefa trabalhosa, quando há um gerenciamento adequado desses resíduos, o seu alto potencial de reciclagem gera lucro às empresas recicladoras, além de inúmeros benefícios ao planeta. A tabela 1 apresenta uma seleção de pesquisas mais relevantes relacionadas a esse tema, presentes na literatura, que demonstram quais os métodos e estratégias são utilizados pelos autores, como caminho para a resolução de problemas de coleta na logística reversa do lixo eletrônico e, de modo geral, ao problema de roteamento de veículos semelhante ao PCLE.

Tabela 1 - Pesquisas com problemas semelhantes ao PCLE

Ano de publicação	Referência	Abordagem
2010	Subramanian, Drummond, Bentes, Ochi e Farias	Metaheurística paralela para o PRVCES - algoritmo desenvolvido (P-ILS-RVND) baseado no modelo master-worker .
2011	Ubeda, Arcelus e Faulin,	Algoritmo heurístico para resolver o PRVC e o PRVB - o objetivo é avaliar as economias obtidas em termos de distância, número de rotas e emissões de CO ₂ utilizando práticas verdes na gestão logística.
2011	Subramanian, Uchoa, Pessoa e Ochi	Algoritmo Branch-and-Cut (BC) para o PRVCES : restrições garantem que as capacidades não sejam excedidas no meio de uma rota, pois são aplicadas de forma preguiçosa.
2013	Mar-Ortiz, González-Velarde e Adenso-Díaz	Modelo de Programação Inteira Mista e algoritmo baseado em GRASP para o PRV para a coleta de REEE – O problema é caracterizado por quatro variantes do PRV rotulada como: <i>Vehicle Routing Problem with Split Loads and Date</i> (VRPSLDW).
2013	Subramanian, Uchoa e Ochi	Algoritmo híbrido (ILS-RVND-SP): combina heurística baseada em ILS , denominada ILS-RVND, e uma abordagem SP (Set Partitioning), para diversas variantes do PRV: PRVCES , PRVCE Mistas e outras.
2015	Silva, Subramanian e Ochi	Algoritmo denominado (SplitILS), baseado em uma Heurística multi-start Iterated Local Search (ILS com RVND) para o <i>Split Delivery Vehicle Routing Problem</i> (SDVRP).
2017	Nowakowski, Król e Mrówczyńska	Modelo para coleta (veículos com frota heterogênea) de REEE sob demanda, incluindo abordagem multicritério baseada em Algoritmo Genético e lógica Fuzzy .
2018	Haddad, Martinelli, Vidal, Martins, Ochi, Souza e Hartl	Metaheurística híbrida baseada em busca local iterada (ILS) com (RVND), denominada ILS-PDSL (ILS para problemas de coleta e entrega com cargas divididas), e o primeiro algoritmo de branch-and-price eficiente para o MPDPSL.
2018	Nowakowski, Szware e Boryczka	Análise de quatro algoritmos de Inteligência Artificial (Simulated Annealing , Tabu Search , Greedy , Bee Colony Optimization) para o PRVJT com frota heterogênea na coleta de e-lixo sob demanda.
2018	Sousa Matos, Frota e Ochi	Método híbrido Multi-Start ILS-SC, o algoritmo é denominado (MS-ILS-SC), baseado em uma heurística ILS multi-start com RVND , e uma formulação SC (Set Covering) para o <i>Green Vehicle Routing and Scheduling Problem</i> (GVRSP) com entregas fracionadas.
2019	Bo, Wang e Wan	Programação Inteira Mista não Linear (MINLP) para o projeto de rede de recuperação de REEE - open-loop network design . O algoritmo heurístico híbrido desenvolvido é baseado no método de Branch and Bound .
2019	Penna, Subramanian, Ochi, Vidal e Prins	Heurística híbrida unificada baseada em ILS e SP (<i>Set Partitioning</i>) para o algoritmo denominado (HILS-RVRP). Primeiro algoritmo unificado projetado para resolver uma ampla classe de RVRPs de Frota Heterogênea (HFRVRPs).
2019	Reddy, Kumar e Ballantyne	Modelo de Programação Linear Inteira Mista para o Design de Rede de Logística Reversa , com abordagem <i>three-phase heuristic</i> baseada em <i>Benders decomposition</i> (BD).
2021	Aquino, Junior, Guarnieri e Silva	Metaheurísticas baseada em GA e GRASP (geração da população inicial do GA), para resolver o modelo matemático para a localização dos pontos de coleta (PLPC) do WEEE .

Embora haja avanços e aumento no interesse por pesquisas nesse setor, muitos desafios ainda precisam ser enfrentados, principalmente em países em desenvolvimento, para que a logística reversa seja implementada de forma mais ampla, tais como: volumes de coleta insuficientes para sustentar financeiramente a operação, lacunas tecnológicas, exportações ilegais de REEE, tributações, resistência de catadores autônomos e empresas informais em repassarem o REEE para centros que possam gerir adequadamente esses resíduos, falta de consciência dos perigos à saúde e ao meio ambiente provocados pelos REEE. No Brasil, esses desafios se potencializam, pois, além dos já citados, o extenso território possui 256 legislações estaduais e municipais distintas, com demandas desiguais ou mesmo contraditórias, devido à falta de um padrão legislativo nacional para REEE e Logística Reversa, conforme [Demajorovic et al 2016].

Atualmente, além dos problemas causados pelo consumismo e descarte indevido dos REEE, o mundo vem enfrentando impactos causados pela pandemia, que refletem em todos os setores da sociedade, principalmente da saúde. Isso porque o surto epidêmico eleva rapidamente o número de mortes e afeta o desenvolvimento econômico dos países, acarretando o aumento da demanda de vários recursos na área a fim de se controlar essa situação. Nesse sentido, é extremamente importante ter um sistema de logística reversa com uma gestão eficiente dos resíduos médicos (resíduos infecciosos, objetos pontiagudos, substância química, resíduos patológicos, resíduos radioativos, REEE etc.), que sofrem um aumento exponencial. Para tanto, o uso de métodos de otimização na

logística reversa durante a pandemia tem sido de extrema importância para que a coleta desses resíduos perigosos seja tratada em tempo hábil, seguro e eficaz, minimizando a propagação do vírus e o risco para os seres humanos [Yu et al 2020]. Além disso, drones, robôs e até carros voadores têm auxiliado hospitais, autoridades e pacientes no enfrentamento à pandemia.

No Brasil, a doença interfere também nas atividades dos catadores, que – atendendo a recomendações de órgãos responsáveis, OMS (Organização Mundial da Saúde) e MS (Ministério da Saúde) –, para sua segurança, buscaram o isolamento social. Todavia, sem apoio governamental, alguns cooperativados dessa categoria continuam se expondo ao risco de ter contato com indivíduos ou materiais infectados pelo vírus, pois necessitam ter uma renda mínima para sobreviverem. Cerca de 800 mil catadores em atividade no país são responsáveis pela coleta de 90% de tudo que é reciclado. Esse setor foi muito impactado pela situação pandêmica, que agravou a condição insalubre dos trabalhadores. Diante disso, o futuro é imprevisível para esse segmento, pois a Covid-19 revela o quanto essa categoria está vulnerável e, mesmo sendo fundamental para o processo da logística reversa do lixo eletrônico, não é valorizada pela sociedade e pelos governantes. Com isso, a falta de infraestrutura de cooperativas de “catadores de lixo” reduz a coleta dos REEE em tempos tão difíceis, o que significa uma grande perda ambiental, de acordo com [Henrique e Mattos 2020].

[Lin et al 2014] sinalizam que outro problema relacionado à coleta de resíduos é o roteamento de veículos “verdes” e apresentam as suas três principais categorias, incluindo o Green-VRP, o Problema de Roteamento de Poluição e o VRP em Logística Reversa. Estudos nesse setor têm sido realizados desde 2006, visando minimizar o consumo de energia e apoiando o uso de combustíveis alternativos em vez de combustíveis fósseis. Além disso, o transporte de materiais residuais é uma questão ligada a *Green Logistics*, pois a gestão de resíduos é um processo essencial para a proteção do meio ambiente e para a conservação de recursos. Observa-se com isso que o amplo escopo desse conteúdo necessita de uma abordagem interdisciplinar e sistemática, incorporando o uso energético e o impacto ambiental, políticas públicas, engenharia, gestão de sistemas de transporte e planejamento urbano, juntamente com as colaborações de pesquisadores e engenheiros de áreas diversas.

Segundo [Popova e Sproge 2021], o nível de urbanização previsto até 2050 para as seis maiores regiões do mundo é de cerca de 74,87%. Devido a essa alta taxa de urbanização mundial, surgiu o paradigma da Cidade Inteligente ou *Smart City* para resolver problemas urgentes provocados por esse desenvolvimento urbano. É nesse cenário que aparecem novas tendências em todas as esferas – econômica, ecológica e social –, onde muitas questões requerem atenção especial, sendo o maior desafio para a *Smart City* a sustentabilidade e a organização de todos os serviços para alcançar os objetivos “verdes”. Nesse sentido, a gestão de resíduos é uma das atividades mais importantes e urgentes para as autoridades. Ressalta-se ainda que, para a implementação dessa ideia, a conscientização da população é fundamental, pois isso contribui diretamente com melhores hábitos sustentáveis. O principal agente de aceleração de projetos em Cidades Inteligentes é a IoT. Conforme [Sharma et al 2020], os sistemas habilitados para IoT proporcionam uma infraestrutura ideal para transformar cidades urbanas em *Smart City*, contribuindo para otimizar a gestão de resíduos, transporte, recursos hídricos, saúde, educação etc. Sendo assim, a gestão eficaz de resíduos é um dos serviços essenciais e que necessitam de inovações urgentes nas comunidades urbanas.

Entretanto, a adoção dessas tecnologias IoT para se desenvolver um ecossistema sustentável ainda sofre com vários entraves, como escalabilidade, questões de segurança, heterogeneidade, arquitetura, governança etc. Como uma nova tendência mundial, o *Big Data* – criado para armazenar, analisar e gerenciar grandes volumes de dados – desponta, impactando no modo de consumo e na vida das pessoas. Nesse contexto, o *e-commerce* está diretamente envolvido nas mudanças da forma com que realizamos compras domésticas. Atualmente é comum, entre os consumidores, uma preferência por compras *on-line* devido à facilidade, comodidade e economia providas pelo *big data*. Além disso, o *e-commerce* tem se tornado uma opção, entre a população, à reciclagem tradicional do lixo eletrônico. Porém, existe uma necessidade grande de estudos complementares sobre o desenvolvimento do *e-commerce* na reciclagem de e-lixo e na aceitação da população em relação a ele. Ainda que menos popular quando comparado à coleta tradicional do *e-waste*, o *e-commerce* demonstra ser uma forma mais econômica de reciclagem de lixo eletrônico. Seu desenvolvimento ajudará a reduzir a coleta desses resíduos por meios ilegais. [Zhang et al 2019].

Segundo [Kapoor et al 2021], ao descartarmos um dispositivo eletrônico, por vezes esquecemos que, mesmo tendo sido excluído ou formatado, muitos desses equipamentos ainda contêm dados e informações pessoais que podem ser recuperados. Assim sendo, tais informações confidenciais se tornam alvos fáceis para cibercriminosos. Portanto, ao se descartar o e-lixo, uma das questões centrais é garantir a privacidade e a segurança dos dados para que a engenharia reversa não se torne um perigo à sociedade. Atualmente, a situação pandêmica aumentou o consumo de eletrônicos, por conseguinte a geração de *e-waste* e atividades ilegais relacionadas ao descarte desses resíduos. Os diversos crimes cometidos foram classificados em: comércio ilegal de lixo eletrônico, crimes ambientais, crimes digitais e cibernéticos. É imprescindível que medidas preventivas sejam implementadas por meio de uma legislação rigorosa e verificações alfandegárias adequadas para importações e exportações. Como o número de páginas é muito limitado nesse evento, colocamos à disposição dos interessados uma lista mais completa dos trabalhos da literatura no tema aqui proposto, que pode ser acessada em: <https://github.com/Snfavila/PCLE>.

3.Descrição do PCLE baseado em clássicos de PRV

O clássico Problema de Roteamento de Veículo (PRV) ou VRP (*Vehicle Routing Problem*), que foi originalmente proposto por Dantzig e Ramser em 1959, é atualmente um dos problemas mais abordados em Pesquisa Operacional, Otimização e Inteligência Computacional devido a sua elevada complexidade computacional e pelo fato de possuir diversas aplicações relevantes na área de Logística Inteligente e Transportes. Atualmente, existem dezenas de variantes do PRV na literatura [Gendreau e Potvin 2010; Subramanian 2012; Penna 2013, Silva et al 2015; Coelho 2015; Haddad 2017]. Dentre as variantes dessa classe de problemas, há algumas que são mais próximas de nosso interesse nesta pesquisa. São elas: Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (PRVFH) [Penna 2013]; Problema de Roteamento de Veículo com Entregas Fracionárias (PRVEF) [Silva et al 2015; Haddad 2018], em que a demanda de um cliente pode ser atendida por mais de um veículo; um outro modelo de VRP próximo ao que estamos tratando no presente trabalho é o Problema de Roteamento de Veículo com Coleta e Entrega. Já existem muitos trabalhos sobre essa variante do PRV: Problema de Roteamento de Veículo com Coleta e Entrega Simultânea (PRVCES), Coleta e Entrega

Mista (PRVCEM), Problema do Caixeiro Viajante com Coleta e Entrega Mista (PCVCEM), Problema de Roteamento de Veículos Multidepósito com Coleta e Entrega, entre outros [Subramanian 2012; Coelho 2015].

O problema de coleta do lixo, mais especificamente o Problema de Coleta do Lixo Eletrônico (PCLE) ou *e-lixo*, é basicamente composto de pontos de coleta (origens) onde a população deixa o objeto a ser descartado em lojas, pontos definidos pela comunidade ou órgãos públicos como prefeitura; e um conjunto de locais destino, onde os resíduos coletados são reciclados ou armazenados. Para efetuar esse transporte, existe uma frota de veículos usualmente heterogêneos que parte de uma garagem, visita as origens para coletar o lixo e os transporta para locais destinos. A coleta de lixo eletrônico, embora o problema se assemelhe ao de roteamento de veículos clássicos e mais proximamente ao de coleta de lixo orgânico, possui algumas peculiaridades e pode diferir, por exemplo, no tamanho dos objetos que, por vezes, podem ser muito grandes, ao contrário do que acontece no lixo orgânico. No *e-lixo*, pode-se incluir geladeiras, televisões, computadores, monitores entre outros, ou seja, objetos de volumes grandes que podem requerer a visita de vários veículos para se realizar a coleta total desse lixo acumulado num dado local origem.

4. Formulação Matemática para o PCLE

A seguir, vamos descrever uma nova formulação matemática proposta neste trabalho para resolver uma versão simplificada do problema de coleta do lixo eletrônico (PCLE) a partir de um conjunto (origens) de coleta $I = \{m \text{ locais onde a população deixa o lixo eletrônico}\}$, um conjunto (destinos) $J = \{n \text{ locais de reciclagem/depósitos do lixo recolhido em } I\}$ e conjuntos K_i de objetos depositados em $i \in I$; $K_i = \{\text{objetos (lixo eletrônico) depositados pela população nas origens } i \in I\}$, e $K = \cup K_i$. Esse modelo simplificado consiste de m pontos de origens $= |I|$; n pontos destino $= |J|$; e onde cada K_i tem associado o número de objetos nele depositados, $\sum_k a_{ki}$. Estamos supondo que: i) os locais origens e destinos, bem como a quantidade de oferta destes, já estão definidos; ii) *as rotas são diretas, de uma origem para um destino, sem pontos intermediários*. Dessa forma, podemos enxergar esse modelo como uma variante do clássico *Problema de Transporte (PT) (The Transportation Problem)*, como ilustrado na figura 1 a seguir. O objetivo dessa formulação é gerar associações otimizadas de transporte, de origens $i \in I$ para destino em J de forma a coletar toda a oferta de I e levar para os destinos J , respeitando a capacidade de cada ponto destino $j \in J$.

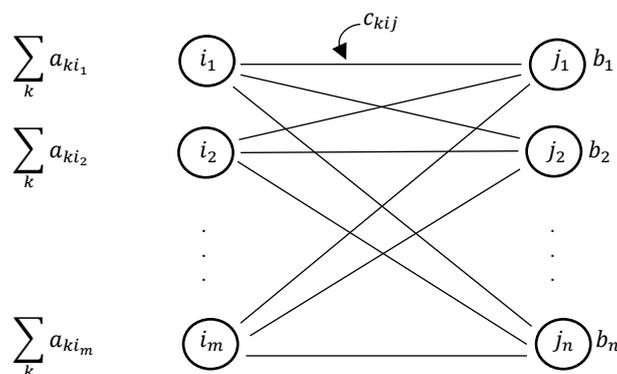


Figura 1: Descrição resumida do modelo

Temos que:

- c_{kij} = custo para transportar uma unidade do objeto k da origem $i \in I$, ao destino $j \in J$;
- a_{ki} = quantidade total de objetos *tipo* $k \in k_i$ disponível na origem $i \in I$;
- b_j = capacidade do destino (ponto de reciclagem) $j \in J$;
- x_{kij} = quantidade do objeto k recolhido na origem i e enviado ao destino j .

O modelo, supondo que as rotas sejam todas simples (direto de uma origem para um destino), torna-se uma variante do problema de transporte. A seguir apresentamos uma formulação matemática de um modelo simplificado para o PCLE.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_k \sum_i \sum_j c_{kij} x_{kij} \quad (1)$$

Sujeito as restrições:

$$\sum_j x_{kij} = a_{ki} \begin{cases} \forall \text{ objeto } k \in k_i \\ \forall \text{ origem } i \in I \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_i x_{kij} \leq b_j, \forall \text{ destino } j \in J \quad (3)$$

$$x_{kij} \geq 0 \text{ e inteiro}, \forall k, \forall i, \forall j \quad (4)$$

Na formulação descrita por (1) – (4), temos que: em (1), a função objetivo busca minimizar os custos de transporte de origens para destino. As restrições (2) obrigam que a oferta de cada origem $i \in I$ deve ser coletada. As desigualdades (3) determinam que a capacidade b_j de cada destino (ponto de reciclagem, depósito) $j \in J$ deve ser respeitada. Finalmente, (4) afirmam que o fluxo x_{kij} deve ser sempre um inteiro não negativo.

5. Resultados

Preliminarmente, o modelo matemático apresentado neste artigo foi implementado para um conjunto contendo oito pequenas instâncias. Atualmente, estamos ampliando esses testes para que a formulação proposta seja avaliada para instâncias de maior porte. Resultados preliminares mostram desempenho promissor desse modelo quando avaliado utilizando o solver *Gurobi*. Observamos, como já era esperado, que à medida que a dimensão dos dados de entrada cresce, as dimensões da matriz associada ao modelo de PLI (Programação Linear Inteira) crescem rapidamente, principalmente com o aumento na quantidade de nós origens (pontos de coleta do lixo eletrônico), bem como da quantidade de objetos coletados. Com isso, modelos exatos mais complexos de PLI incorporando mais características do problema aqui abordado devem mostrar suas limitações em instâncias de elevadas dimensões. Portanto, surge a alternativa de usar metaheurísticas eficientes para soluções de alta qualidade em tempos computacionais viáveis.

6. Conclusões

Neste trabalho, é abordado o *Problema de Coleta do Lixo Eletrônico* (PCLE), que é um problema importante em logística e transporte. Melhorar a eficiência de coleta desses resíduos é uma tarefa extremamente necessária para as metas de cidades inteligentes cada vez mais sustentáveis, uma vez que tanto a coleta quanto a entrega em locais de reciclagem ou depósitos são questões básicas da logística reversa e possuem alta

relevância para a sociedade, necessitando urgentemente obter a diminuição dos impactos ambientais provocados pelos altos índices de acúmulo de lixo eletrônico no planeta. Durante esta pesquisa, alguns benefícios foram observados com a gestão adequada desses resíduos – rotas viáveis e otimizadas –, redução de custo, danos ao meio ambiente e à saúde dos seres vivos, além de garantir ao consumidor o direito de devolução e troca de mercadorias.

Como proposta para essas questões, descrevemos uma nova formulação matemática para resolver uma *versão simplificada* do PCLE desenvolvida como um problema de PLI. O nosso objetivo foi gerar associações otimizadas de transporte a fim de criar rotas que colaborem com melhorias na coleta desses resíduos. Essa modelagem servirá como base para novas pesquisas e ponto de partida na busca de soluções associadas às metaheurísticas para modelos mais complexos do PCLE. A experiência da equipe do LABIC IC/UFF em Inteligência Computacional aponta, como um caminho eficaz para a solução do PCLE, o uso de algoritmos em formas híbridas tanto de várias metaheurísticas como conjugando metaheurísticas com métodos exatos para resolver as diferentes variantes mais completas do PCLE incluindo, por exemplo, a etapa de localização otimizada dos pontos de coleta e entrega dos resíduos e roteamento destes por uma frota de veículos a partir de uma garagem de onde saem e retornam ao final da jornada.

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”, <https://creating.city/>, March.
- 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, <https://cetic.br/media/docs/publicacoes/6/20191217174403/panorama-setorial-xi-4-lixo-eletronico-atualizado.pdf>, May.

- 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, <https://www.youtube.com/watch?v=rReON8X4yng&t=161s>, July.
- Ochi, L. S. (2021b). "[EI/PGC 2021] Cidades Inteligentes & Sustentáveis" (lecture), Universidade Federal Fluminense, Niterói – Rio de Janeiro, <https://www.youtube.com/watch?v=Z4AXfsrQLrs>, October.
- 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 Spröge, 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.; 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.