

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

KARINA PEDRINI FRAGA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS COM BASE
NO MODELO *TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE
ROUTING PROBLEM***

VITÓRIA

2016

KARINA PEDRINI FRAGA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS COM BASE
NO MODELO *TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE
ROUTING PROBLEM***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

Coorientador: Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro.

VITÓRIA

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

F811m Fraga, Karina Pedrini, 1988-
Modelo matemático para planejamento da logística reversa de pneus inservíveis com base no modelo *two-echelon capacitated vehicle routing problem* / Karina Pedrini Fraga. – 2016.
97 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Coorientador: Glaydston Mattos Ribeiro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Problema de roteamento de veículos. 2. Veículos a motor – Frotas. 3. Pneus – Aspectos ambientais. 4. Logística reversa. 5. Modelagem matemática. 6. *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)*. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Ribeiro, Glaydston Mattos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

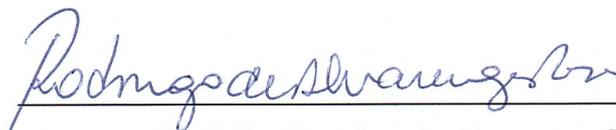
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS COM BASE NO MODELO TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM

Karina Pedrini Fraga

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

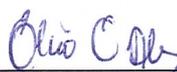
Aprovada no dia **29 de fevereiro de 2016** por:



Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador - UFES



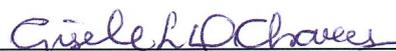
Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Doutor em Computação Aplicada
Co-orientador - COPPE/UFRJ



Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Doutor em Computação Aplicada
Examinador Externo - UFES - Campus Alegre



Profa. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves
Doutora em Engenharia de Produção
Examinadora Externa – Campus São Mateus

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois “sei que Seus olhos sempre atentos permanecem em mim”.

Agradeço à minha família a compreensão, todo o esforço, a paciência e o apoio despendidos a mim durante o mestrado.

Agradeço ao meu orientador Rodrigo de Alvarenga Rosa pela orientação, por todo o conhecimento passado a mim e pela disponibilidade de atendimento. E ao meu coorientador Glaydston Mattos Ribeiro por me apresentar o programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Ufes.

Agradeço à banca por todas as sugestões e críticas construtivas dadas desde a qualificação. Agradeço ao grupo LAMMEP por todo apoio e ajuda, principalmente à Lirielly Vitorugo.

Sou muito agradecida ao amigo psicólogo Wallace Ribeiro, por sempre me ajudar a buscar resiliência e potência para enfrentar os desafios não só do mestrado, mas da vida.

Agradeço aos meus queridos amigos Cristiano Hemerly e Eduardo Zambon, que acompanharam minha trajetória no mestrado, sempre incansáveis em me escutar e aconselhar. Às minhas amigas Guanaeli Deolindo, Mayara Barbosa e Talita Côpo, agradeço ao companheirismo de sempre, independente da distância.

Agradeço à Lara Venturini e à Aline Andrade pela amizade e companheirismo na minha estadia em Vitória. E à Gessica Soares por sempre me receber tão bem em sua residência.

Sou grata à Bianca Arpini, Noéle Bissoli Perini e Thiara Cezana, as melhores veteranas que eu poderia ter, pelo fornecimento de material, dicas e orientações para a minha jornada no mestrado.

Por fim, agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

De maneira geral, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

“É do buscar e não achar que nasce o que eu
não conhecia”

Clarice Lispector

RESUMO

O número de veículos que circulam no mundo tem crescido rapidamente, demandando pneus de borracha que se desgastam e precisam ser substituídos. Estes pneus devem ser eliminados corretamente após o fim de sua vida útil, pois podem causar problemas ambientais e de saúde. Junto ao crescimento do uso de pneus, legislações tem sido criadas a fim de estabelecer o planejamento da logística reversa dos produtos pós-consumo e tem crescido a pesquisa no campo da logística reversa envolvendo fatores ambientais. O *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* (2E-CVRP) é um problema de roteamento de veículos em dois níveis que realiza a distribuição de mercadorias do depósito aos clientes com o auxílio de depósitos intermediários. Sob a ótica da logística reversa, o 2E-CVRP possibilita a coleta de produtos inservíveis para sua disposição final e/ou reciclagem. Nesse contexto, esta dissertação propõe uma nova classe do 2E-CVRP, que foi chamado de *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence* (2E-CVRP-HFSD) para o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis. Como diferencial, o modelo considera a possibilidade de existência de frota heterogênea no 2º nível do problema e restrições de acesso de alguns veículos a determinados clientes, de acordo com o porte do veículo. Além disso, sua função objetivo considera os custos fixos de transporte envolvidos no problema e não apenas os custos variáveis de transporte, os custos das viagens realizadas e o custo de operação das cargas nos satélites. O modelo foi aplicado à logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo a partir da definição de 22 instâncias e, com o uso do *solver* CPLEX 12.6, resolveu de maneira ótima 19 das 22 instâncias definidas e apresentou *gaps* de no máximo 8,99% após um tempo execução de 7.200 segundos nas instâncias não resolvidas de maneira ótima. Essa pesquisa contribuiu para a literatura por apresentar uma nova variação ao modelo 2E-CVRP e por tratar da resolução da logística reversa de pneus, já que comumente o 2E-CVRP é modelado para distribuição de mercadorias e aqui foi desenvolvido para a consolidação, num fluxo reverso.

Palavras-chave: *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem*. Frota Heterogênea. Restrição de Acesso. Logística Reversa. Modelagem Matemática.

ABSTRACT

The number of vehicles circulating in the world has grown quickly, demanding rubber tires that can wear out by time out and need to be replaced. These tires must be disposed of properly after the end of their useful life as it can generate environmental and health problems. Alongside the growth of tire's use, legislation has been created in order to establish the planning of reverse logistics of post-consumer products and also, the research in the field of reverse logistics, involving environmental factors, has been growing too. The Two-echelon capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP) is a vehicle routing problem into two levels which performs the goods' distribution from the storage to the customers with the help of intermediate storages. From the perspective of reverse logistics, the 2E-CVRP enables the collection of waste products to their final disposal and/or recycling. In this context, this work proposes a new 2E-CVRP class, which was called Two-echelon capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence (2E-CVRP-HFSD) for the planning of reverse logistics of waste tires. As a differential, the model considers the possibility of heterogeneous fleet on the second level of the problem and access restrictions for some vehicles to certain customers, according to the size of the vehicle. In addition, its objective function considers the fixed transport costs involved in the problem and not only variable transport costs, travel costs and the operating cost of the loads on satellites. The model was applied to the reverse logistics of waste tires in the state of the Espírito Santo. From the definition of 22 instances and by using the CPLEX solver 12.6, it was solved, optimally, 19 of the 22 defined instances, presenting gaps in the maximum 8.99% after a running time of 7200 seconds in the instances not solved optimally. This research contributed to the literature by presenting a new variation to 2E-CVRP model and treat the resolution of the reverse logistics of tires, as commonly the 2E-CVRP is modeled for distribution of goods and here it was developed for consolidation, in a reverse flow.

Key-words: Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. Heterogeneous Fleet. Site Dependence. Reverse Logistic. Mathematical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Centro de Distribuição Urbano – consolidação	15
Figura 2 – Taxonomia 2E-VRP.....	20
Figura 3 – Distribuição 2E-CVRP.....	22
Figura 4 – Classificação da pesquisa.....	33
Figura 5 – Classificação do modelo matemático proposto segundo Perboli, Tadei e Vigo (2011).....	35
Figura 6 – Etapas da Metodologia da Pesquisa	36
Figura 7 – Representação da rede de logística reversa do pneu	39
Figura 8 – Distribuição 2E-CVRP	41
Figura 9 – Valor da Função Objetivo para as instâncias do Grupo 1	61
Figura 10 – Quantidade de clientes atendidos para as instâncias do Grupo 1	61
Figura 11 – Distância percorrida no 2º nível para as instâncias do Grupo 1	62
Figura 12 – Função Custo da logística reversa para as instâncias do Grupo 2	64
Figura 13 – Quantidade de clientes atendidos nas instâncias do Grupo 2.....	65
Figura 14 – Distância percorrida no 2º nível para as instâncias do Grupo 2.....	65
Figura 15 – Roteamento da Instância 12	75
Figura 16 – Roteamento da Instância 17	76
Figura 17 – Roteamento da Instância 22	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos 2E-VRP	29
Tabela 2 – Instâncias do Grupo 1	47
Tabela 3 – Instâncias do Grupo 2	50
Tabela 4 – Estimativa do número de pneus inservíveis gerados diariamente em cada município do ES	53
Tabela 5 – Matriz distância.....	54
Tabela 6 – Capacidades dos veículos.....	55
Tabela 7 – Custo variável de transporte.....	55
Tabela 8 – Custo fixo de transporte	56
Tabela 9 – População das cidades do Espírito Santo consideradas no estudo	56
Tabela 10 – Custo de um funcionário.....	57
Tabela 11 – Custo anual de operação	57
Tabela 12 – Resultados das instâncias do Grupo 1	59
Tabela 13 – Resultados das instâncias do Grupo 2	63
Tabela 14 – Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias do Grupo 1	66
Tabela 15 – Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias do Grupo 1	67
Tabela 16 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 1	68
Tabela 17 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 2	70

LISTA DE SIGLAS

2E-VRP – *Two-echelon Vehicle Routing Problem*

2E-CVRP – *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem*

2E-CVRP-HFSD – *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence*

2E-CVRP-TW – *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows*

2E-CVRP-SS – *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Satellites Synchronization*

2E-CVRP-PD – *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Deliveries*

2E-CVRP-TS – *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Taxi Services*

2E-CVRPTD – *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Dependent*

2E-MTVRP-SS – *Two-echelon Multiple-trip Vehicle Routing Problem with Sattelite Synchronization*

2SS-MDMT-VRPTW – *Two-echelon, Synchronized, Scheduled, Multi-depot, Multiple-tour, Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows*

ALNS – *Adaptive Large Neighborhood Search*

BP – *Branch-and-price*

CDU – *Centros de Distribuição Urbana*

CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

ICP – *Indicadores Chave de Perfomance*

MDCVRP – *Multidepot Capacitated Vehicle Routing Problem*

ME-DS – *Multi-echelon distribution systems*

ME-VRP – *Multi-echelon Vehicle Routing Problem*

PD – Programação Dinâmica

PGP – Plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação de pneus inservíveis

PLIM – Programação Linear Inteira Mista

PLR – Programação Lógica por Restrições

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

VND – *Variable Neighborhood Descent*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM	21
2.1.1	Revisão de Literatura do 2E-CRP	24
2.2	LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS.....	30
2.2.1	Legislação acerca de pneus inservíveis.....	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE PESQUISA	33
3.2	CLASSIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO QUANTO AOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO	34
3.3	ETAPAS DA METODOLOGIA DA PESQUISA	35
3.4	PROBLEMA REAL DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS ANALISADO	37
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	40
5	OBTENÇÃO DOS DADOS	47
5.1	GERAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS.....	52
5.2	MATRIZ DE DISTÂNCIA.....	53
5.3	VEÍCULOS UTILIZADOS E CUSTOS DE TRANSPORTE.....	55
5.4	CUSTO DE OPERAÇÃO	57
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	59
6.1	ANÁLISE DA REDE LOGÍSTICA REVERSA	72
6.2	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	78
7	CONCLUSÕES	80
7.1	SUGESTÕES A TRABALHOS FUTUROS.....	81

REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – Rotas encontradas em cada instância	87

1 INTRODUÇÃO

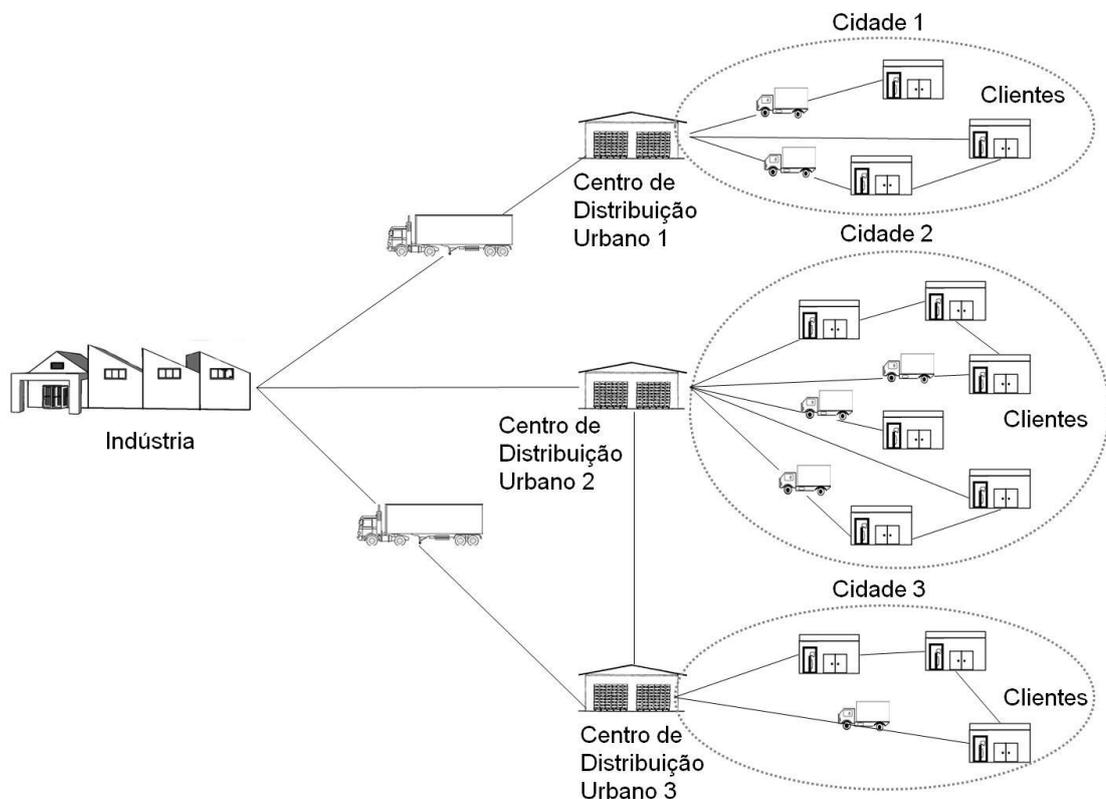
O crescimento das cidades tem levado a um consumo maior de diversos produtos que, após o consumo, muitas vezes necessitam ser retornados para seus fabricantes para uma destinação adequada perante a lei. Em especial, o número de veículos em circulação no mundo tem crescido muito rapidamente, veículos que usam pneus de borracha que se desgastam e precisam ser substituídos. No entanto, a disposição desse pneu inservível é realizada, principalmente, de forma incorreta em todo o mundo. Muitos pneus são dispostos no meio ambiente causando problemas ambientais, como assoreamento de rios e poluição atmosférica devido a liberação de gases como monóxido de carbono, metais pesados, dioxinas e furanos (Veloso, 2016), assim como problemas de saúde pública, com a proliferação dos mosquitos que levam a doenças como malária, dengue e zika. Essas doenças têm sido consideradas problemas de saúde pública mundial, reconhecidas inclusive pela ONU.

A lei brasileira Nº 12.305/2010 estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para operacionalizar ações pertinentes à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos no Brasil. A PNRS prevê a elaboração de planos de gerenciamento de resíduos sólidos nos âmbitos nacional, estadual, microrregional, municipal e organizacional e estabelece a responsabilidade compartilhada do ciclo de vida do produto aos fabricantes, aos importadores, aos distribuidores, aos comerciantes, aos consumidores e aos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. Sendo assim, os consumidores são responsáveis pela devolução dos produtos após o uso aos comerciantes ou distribuidores. Estes têm a responsabilidade de realizar a entrega destes produtos aos fabricantes ou importadores, que darão destinação adequada a esses produtos. Além da PNRS, a destinação ambientalmente correta de pneus inservíveis no Brasil é regulamentada por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2010; CONAMA, 1999, 2002, 2009).

O surgimento de leis ambientais tem estimulado o crescimento da pesquisa no campo da logística envolvendo fatores ambientais (JABALI *et al.*, 2012). Uma aplicação de pesquisa nessa área é a logística reversa estruturada em Centros de Distribuição Urbana (CDU). Os CDUs são instalações localizadas preferencialmente

próximas à entrada das cidades ou junto a transportes aéreos, ferroviários ou terminais de navegação. Os CDUs destinam-se a consolidar cargas recebidas por meio de veículos de grande porte em veículos menores, que farão a distribuição dentro do perímetro urbano. Esse fluxo também pode ocorrer no sentido inverso (CRAINIC; RICCIARDI; STORCHI, 2009). Neste caso, os CDUs passam a consolidar cargas recebidas de veículos de pequeno porte para serem coletadas por veículos de maior porte. A consolidação de um CDU é esquematizada na Figura 1.

Figura 1 – Centro de Distribuição Urbano – consolidação



Fonte: Adaptado de Quak (2008, p.67).

Para desenvolver um roteamento de veículos que suporte a logística reversa por meio do uso de CDUs, o problema de roteamento que tem sido mais citado na literatura é o *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)* (CUDA; GUASTARROBA; SPERANZA, 2015). Embora seja um problema que tenha sido proposto recentemente, com poucas publicações na área, o 2E-CVRP tem recebido cada vez mais atenção em periódicos com alto fator de impacto (JEPSEN; ROPKE; SPOORENDONK, 2013).

Assim, esta dissertação apresenta um modelo matemático baseado no 2E-CVRP para a logística reversa de produtos pós-consumo estruturada em CDUs, com a proposição do modelo *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence* (2E-CVRP-HFSD). O modelo baseou-se no modelo proposto por Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013) e difere dele por considerar a existência de frota heterogênea e restrição de acesso de certos tipos de veículos a algumas vias no 2º nível do 2E-CVRP.

O modelo proposto foi testado no caso real de logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, Brasil. A logística reversa de pneus começa com a necessidade de descarte de pneus após o fim da sua vida útil. Esse descarte pode ocorrer quando o consumidor final transporta pneus usados para os revendedores de pneus ou para pontos de coleta. Então, esses pneus são enviados para uma empresa de reciclagem. Várias instâncias com base na capacidade da empresa recicladora e na estimativa de geração de pneus inservíveis no Espírito Santo foram definidas e testadas para implementar a logística reversa de pneus inservíveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é propor um modelo matemático para representar problemas de roteamento de veículos em dois níveis para a logística reversa de produtos pós-consumo estruturada em CDUs, que admita frota heterogênea e restrições de acesso. O modelo matemático proposto passou a ser denominado como *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- fazer um levantamento da geração de pneus utilizados no Espírito Santo e

- sua atual logística reversa;
- fazer um levantamento das empresas produtoras de pneu que devem realizar a logística reversa desses pneus;
 - realizar um estudo da PNRS e de resoluções do CONAMA em relação às responsabilidades da execução da disposição final do produto pós-consumo;
 - realizar a análise logística para a logística reversa de pneus, determinando as rotas ótimas e a destinação para cada CDU de pneus inservíveis no Espírito Santo, minimizando o custo total de logística; e
 - avaliar a logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo analisando diversas possíveis instâncias.

1.2 JUSTIFICATIVA

No setor pneumático, cerca de 800 milhões de pneus são descartados anualmente no mundo e, devido a legislações ambientais que cada vez mais responsabilizam as cadeias industriais pela destinação final de produtos pós-consumo e pós-venda, a busca por boas práticas de gestão do fluxo reverso de produtos tem tido grande relevância empresarial e acadêmica (FRAGMAQ, 2012; LEITE, 2009; PNRS, 2012).

Assim, esta dissertação se justifica por possibilitar uma melhoria na gestão da logística reversa de pneus inservíveis, imprescindível para mercados que já vêm buscando soluções para o seu reaproveitamento, como no Brasil, que utiliza pneus inservíveis como solado de sapatos, borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais, tapetes para automóveis e, principalmente, como combustível alternativo para as indústrias de cimento (RECICLANIP, 2015).

No âmbito da logística urbana, este trabalho se torna importante devido à proposição da aplicação de uma variação do modelo 2E-CVRP a um problema de logística reversa, visto que a racionalização da coleta/distribuição por meio de CDUs é comumente usada em sistemas de distribuição, não considerando os fluxos reversos da cadeia (CRAINIC; RICCIARDI; STORCHI, 2009).

Considerando ainda a relevância dos sistemas de distribuição em vários níveis (CRAINIC *et al.*, 2008), este trabalho se justifica como uma contribuição para a

literatura, principalmente ao problema de distribuição em dois níveis, à logística reversa e à preocupação ambiental.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O restante desta dissertação está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta conceitos relevantes ao tema da dissertação, como o problema de roteamento de veículos, sistemas de distribuição em múltiplos níveis, o 2E-CVRP, a logística reversa de pneus e uma revisão da literatura acerca do 2E-CVRP. O Capítulo 3 expõe classificações em relação à pesquisa e a maneira como o trabalho foi realizado, além de descrever o problema real analisado na aplicação do 2E-CVRP. O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto. O Capítulo 5 mostra como as instâncias e os dados utilizados foram definidos. O Capítulo 6 expõe os resultados e análises dos resultados do modelo proposto. Por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 7.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um problema importante no planejamento logístico e de transportes é o *Vehicle Routing Problem* (VRP), que é um problema de otimização combinatória e busca a determinação de rotas ótimas para o atendimento de demandas conhecidas dos clientes, com o objetivo de minimizar custos globais de transporte. No VRP, o transporte de cargas ocorre de maneira direta, na qual veículos partem de um depósito, atendem a todos os clientes e só então retornam ao depósito de origem (MONTROYA-TORRES *et al.*, 2015; BALDACCI; MINGOZZI; ROBERTI, 2013).

A variação mais básica do VRP é o *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), um problema que utiliza uma frota homogênea de veículos para realizar as entregas, em que as rotas são limitadas pela capacidade do veículo ou pelo tempo máximo permitido de viagem do veículo (BALDACCI; MINGOZZI; ROBERTI, 2013).

No problema de roteamento de veículos em vários níveis, conhecido como *Multi-echelon Vehicle Routing Problem* (ME-VRP) (SITEK; WIKAREK, 2014), têm-se que a carga de um fornecedor pode ser entregue ao cliente por meio de vários estágios e meios de transporte, envolvendo transportes de longa e de curta distância. O problema pode ser usado tanto para entrega quanto para coleta (SCHMID; DOERNER; LAPORTE, 2013). A entrega de mercadorias provenientes de um ou mais depósitos ocorre por meio de depósitos intermediários, conhecidos como satélites, onde as cargas são consolidadas. No primeiro nível, produtos são transportados dos depósitos aos satélites de primeiro nível. Em níveis intermediários ocorre o transporte entre satélites e, no último nível, a carga é entregue ao cliente (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011). Dessa forma, fábricas, depósitos, armazéns e clientes são organizados em níveis e só é permitido o transporte de produtos em um mesmo nível (SANTOS; DA CUNHA; MATEUS, 2013).

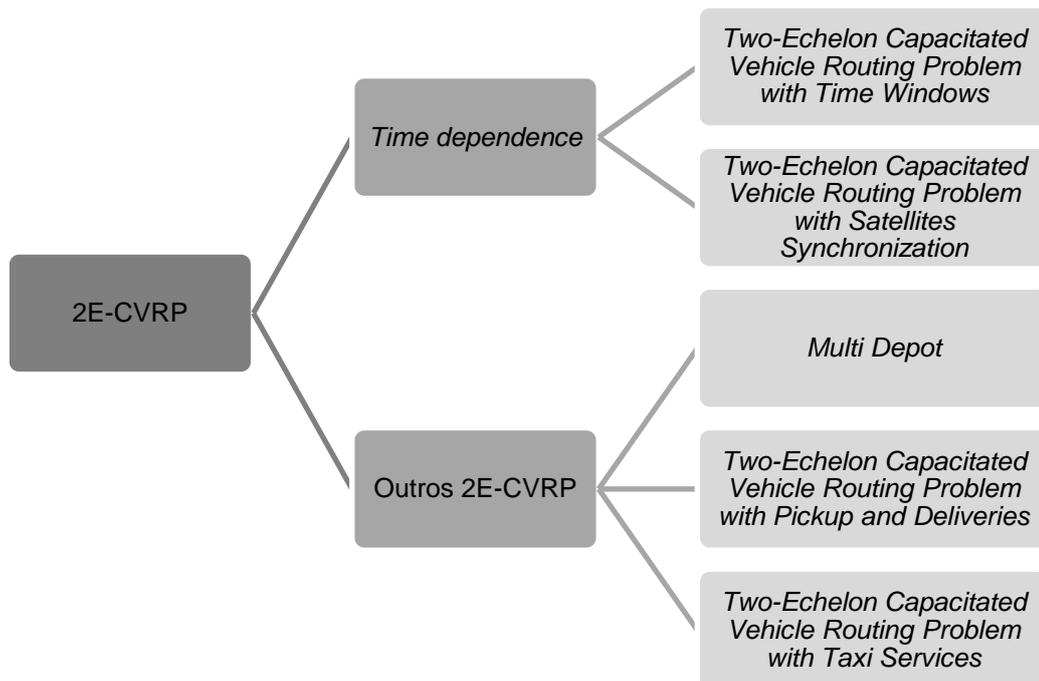
Tendo em vista as novas opções logísticas de dividir a rede de distribuição ou coleta em vários níveis, é possível obter, além da redução dos custos de transportes, ganhos no ponto de vista ambiental, já que com a distribuição em vários níveis é viável a utilização de veículos menores para a realização de entregas a curtas distâncias, o que reduz a poluição do ar e o congestionamento das vias urbanas (MANCINI, 2013).

Aplicações de distribuição em vários níveis podem ser vistas em empresas de logística, empresas de serviços de entrega expressa, entrega de grandes redes de supermercados, transporte de carga, abastecimento de cadeias de suprimentos, serviços de *e-commerce*, serviços de entrega em domicílio e logística urbana e logística de serviços públicos (SITEK; WIKAREK, 2014).

O VRP é um problema do tipo *NP-hard* e o ME-VRP é mais complexo ainda, sendo necessário muitas vezes, para a sua resolução, métodos heurísticos e meta-heurísticos (MEIHUA *et al.*, 2011).

A prática da logística em vários níveis é, na maioria das vezes, implementada em dois níveis, e por isso foi proposto o modelo matemático *Two-echelon Vehicle Routing Problem* (2E-VRP). Perboli, Tadei e Vigo (2011) apresentaram uma taxonomia para o 2E-CVRP, a variação mais simples do 2E-VRP, em que os satélites e os veículos utilizados nos dois níveis possuem restrições de capacidade. O 2E-CVRP será detalhado na Seção 2.1 por ser o foco desta dissertação. Na taxonomia apresentada por Perboli, Tadei e Vigo (2011), destaca-se a variação *Time dependence* de outras variações. Essa taxonomia é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Taxonomia 2E-VRP



Fonte: Elaborado pela autora.

As variações *Time Dependence* consistem nos problemas *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (2E-CVRP-TW) e *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Satellites Synchronization* (2E-CVRP-SS). O 2E-CVRP-TW considera *time windows* para chegada ou saída em satélites e/ou clientes. As janelas de tempo podem ser do tipo *hard*, não podendo ser violada, ou do tipo *soft*, podendo ser violada mediante a existência de um custo. Já o 2E-CVRP-SS é uma extensão do 2E-CVRP em que as chegadas e saídas dos satélites sofrem restrições de tempo, de maneira que cargas que chegam aos satélites por meio de veículos do 1º nível devem imediatamente ser carregadas em veículos do 2º nível para serem entregues aos clientes. As restrições podem ser do tipo *hard* ou *soft*, assim como no 2E-CVRP-TW (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011).

Outras variações do 2E-CVRP consideradas são *Multi depot*, *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Deliveries* (2E-CVRP-PD) e *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Taxi Services* (2E-CVRP-TS). A variação *Multi depot* consiste em problemas em que os satélites podem receber cargas de vários depósitos. O 2E-CVRP-PD é uma extensão do 2E-CVRP em que os satélites realizam a função de fracionamento da carga a ser entregue aos clientes e também de consolidação de cargas coletadas dos clientes. Por fim, o 2E-CVRP-TS consiste em problemas em que são permitidas entregas diretamente do depósito aos clientes, caso isso diminua custos, ou ainda, seja necessário para o atendimento de restrições de tempo ou sincronização (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011).

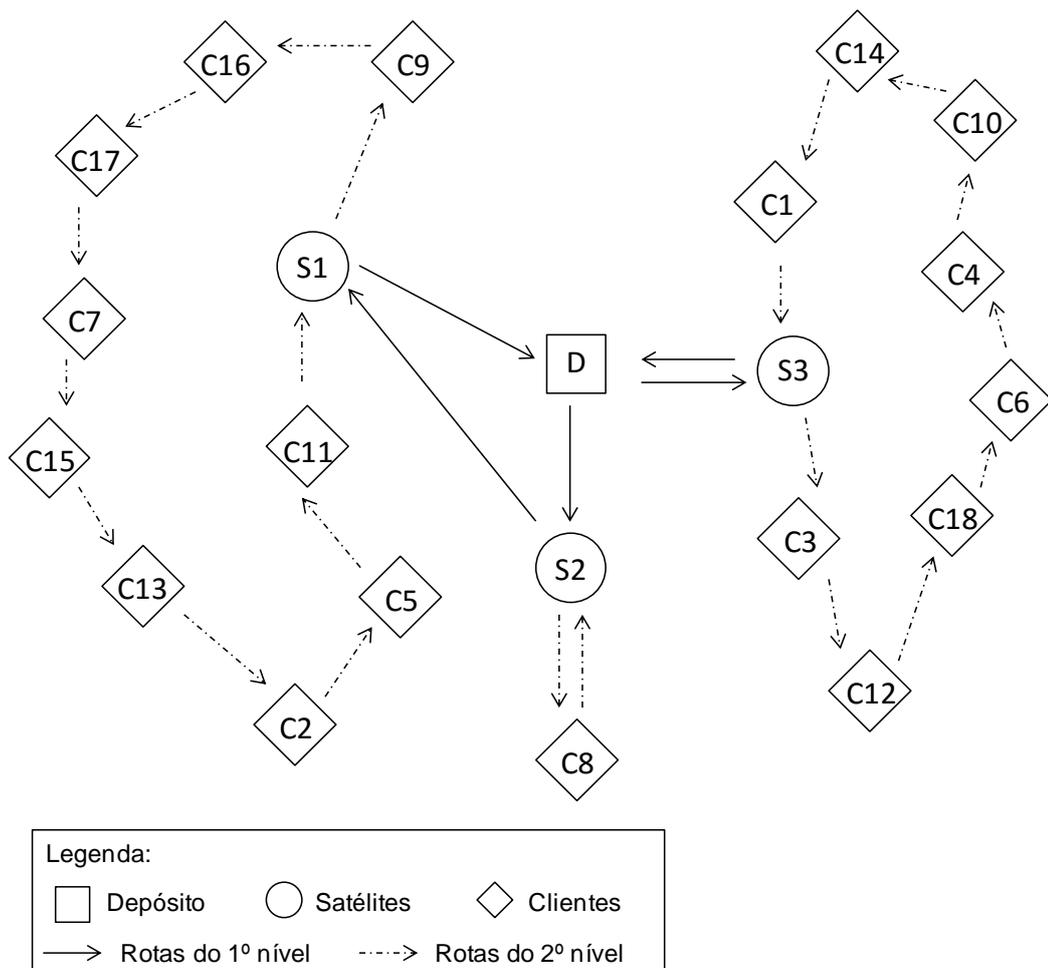
Outras variações do 2E-VRP são mostradas nas aplicações encontradas na Revisão da Literatura, Seção 2.1.1.

2.1 TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM

O *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* é um problema *Multi-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* (ME-CVRP) que analisa o sistema em dois níveis, sendo composto por um ou mais depósitos, um número fixo de satélites e uma frota homogênea fixa de veículos em cada nível, com restrições de capacidade para os satélites e para os veículos das frotas dos dois níveis. Através das rotas de

primeiro nível é realizado o transporte das cargas demandadas pelos clientes do depósito aos satélites e, das rotas de segundo nível, a entrega dos satélites aos clientes (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011). Um esquema da distribuição em 2E-CVRP é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição 2E-CVRP



Fonte: Elaborado pela autora.

No 1º nível, as rotas possuem início e fim no depósito, enquanto no 2º nível as rotas devem terminar no satélite de origem (SOYSAL, BLOEMHOF-RUWAARD; BEKTAS, 2014). Os satélites possuem tamanho menor que o depósito e podem armazenar cargas por um curto período de tempo (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011). Além disso, diferentes satélites podem ter diferentes capacidades (CRAINIC *et al.*, 2010). Nos satélites ocorrem atividades de descarregamento dos veículos do 1º nível e

carregamento dos veículos do 2º nível e o custo dessas atividades, custo de operação, é proporcional à carga descarregada/carregada (BALDACCI; MINGOZZI; ROBERTI, 2013), sendo considerado apenas um tipo de produto a ser transportado e ignorado o tempo de entrega (FELIU *et al.*, 2007; CRAINIC *et al.*, 2008, CRAINIC *et al.*, 2010).

Cada satélite possui localização e capacidade conhecidas. A frota de veículos do 1º nível encontra-se localizada no depósito e a frota de veículos do 2º nível é compartilhada pelos satélites. Cada veículo do 1º nível pode transportar produtos de um ou mais clientes e atender mais de um satélite por rota, mas não é permitido que sejam realizadas entregas diretamente do depósito aos clientes. Cada satélite pode ser servido por um ou mais veículos do 1º nível, enquanto cada cliente só pode ser atendido por meio de um veículo do 2º nível (CUDA; GUASTAROBA; SPERANZA, 2015). Assim, considera-se que entregas fracionadas só podem ocorrer no 1º nível (CRAINIC *et al.*, 2008). É possível, ainda, que um ou mais satélites não sejam utilizados (JEPSEN; ROPKE; SPOORENDONK, 2013).

Como objetivo, o 2E-CVRP busca encontrar um conjunto de rotas para cada nível, de maneira a satisfazer a demanda de todos os clientes, respeitando as capacidades dos satélites e dos veículos, com a minimização do custo total de transporte (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011). Esse custo é dado pelos custos das rotas percorridas pelos veículos e pelo custo de operação das cargas nos satélites (JEPSEN; ROPKE; SPOORENDONK, 2013). Embora o transporte em sistemas de distribuição de dois níveis só permita entregas em um mesmo nível, o problema não deve ser resolvido tratando cada nível separadamente (CUDA; GUASTAROBA; SPERANZA, 2015).

Como a capacidade dos veículos do 2º nível deve ser menor que a capacidade dos veículos do 1º nível, o 2E-CVRP é de grande relevância para o atendimento de clientes localizados em cidades que possuem regulamentações que restrinjam o tráfego de grandes veículos em suas vias, bastando a inserção de satélites em tais cidades (BALDACCI; MINGOZZI; ROBERTI, 2013; SOYSAL, BLOEMHOF-RUWAARD; BEKTAS, 2014).

É apresentada a seguir, ainda nesta Seção, uma revisão da literatura sobre o 2E-CVRP.

2.1.1 Revisão de Literatura do 2E-CRP

Uma formulação para o 2E-CVRP foi realizada pela primeira vez por Feliu *et al.* (2007). Eles introduziram o ME-CVRP, uma nova família do VRP, e desenvolveram um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e validaram inequações para a resolução do 2E-CVRP. Antes disso, a literatura apresentava trabalhos que geralmente tratavam apenas o último nível de sistemas *multi-echelon* como um problema de roteamento, sendo os demais níveis abordados de maneira simplificada (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011). No Trabalho de Feliu *et al.* (2007), testes com instâncias de pequeno porte encontradas na literatura para o CVRP, com até 2 satélites e 12 clientes, foram realizados para validar o modelo e mostraram que o 2E-CVRP é capaz de apresentar menores valores para o custo de transporte, se comparado com a modelagem do CVRP, em 42 das 66 instâncias testadas. Dessa forma, essa economia nos custos de transportes permite balancear os custos de carregamento e de descarregamento de cargas nos satélites adquiridos com a introdução do 2E-CVRP e obter as vantagens que a distribuição em dois níveis proporciona, como redução de congestionamentos e de poluição. Outros testes foram realizados para mensurar o comportamento do modelo com as inequações validadas e mostraram que, para as instâncias de pequeno porte, a utilização das inequações resultou em melhores tempos de resolução do problema, se comparado ao modelo proposto sem as inequações. Para os testes com instâncias de até 4 satélites e 50 clientes, o uso de inequações apresentou, para instâncias com até 4 satélites e 32 clientes, melhores resultados do que o modelo sem o seu uso tanto para a solução inicial como para os valores de *lower bound*, apresentando *gaps* pequenos.

Complementar ao trabalho de Feliu *et al.* (2007), Perboli, Tadei e Vigo (2008), Perboli e Tadei (2010) e Perboli, Tadei e Vigo (2011), além de apresentarem a família *Two-echelon Vehicle Routing Problem* e o 2E-CVRP, assim como um modelo de Programação Inteira Mista e Inequações para a resolução deste problema baseados em cortes aplicados em formulações de VRP, esses autores propuseram também duas *math-heuristics*. Testes comparando as *math-heuristics* e a solução encontrada para o modelo exato desenvolvido mostraram que uma *math-heuristic* não domina a outra, mas a combinação das duas resulta em melhor desempenho tanto no ponto de vista computacional como na qualidade da solução.

Crainic *et al.* (2008) propuseram as meta-heurísticas *Split-large-route*, *Add* e *Exchange* para o problema 2E-CVRP, baseadas nas abordagens de *clustering* e múltiplos depósitos VRP. Para a resolução do problema, o 1º e o 2º níveis foram separados e resolvidos sequencialmente como dois subproblemas, um para cada nível, sendo o 1º nível considerado um VRP e o 2º nível podendo ser um *multi depot* VRP ou vários VRPs. Foram utilizados 2 conjuntos num total de seis instâncias pequenas, encontradas em *Feliu et al.* (2007), com 1 depósito; 2 satélites; e 21 ou 32 clientes, respectivamente e 3 conjuntos, com 54 instâncias no total, com 1 depósito; 2, 3 ou 5 satélites; e 50, 100 ou 150 clientes, respectivamente. Os resultados mostraram que métodos exatos podem ser usados para problemas com instâncias pequenas, mas com o aumento do tamanho das instâncias se faz necessário o uso de heurísticas. Para pequenas instâncias, tanto a heurística de *clustering* quanto a de múltiplos depósitos mostraram bom desempenho e o método de *clustering* mostrou melhor desempenho para instâncias maiores que os outros métodos abordados.

Crainic, Ricciardi e Storchi (2009) apresentaram uma variação do 2E-CVRP, chamada de *two-echelon, synchronized, scheduled, multi-depot, multiple-tour, heterogeneous vehicle routing problem with time windows* (2SS-MDMT-VRPTW), ao tratar o gerenciamento da Logística Urbana. Esses autores desenvolveram um modelo e formulações gerais para a nova classe a partir de Programação Linear Inteira, mas não realizaram nenhum experimento computacional para a mesma.

Crainic *et al.* (2010) apresentaram uma família de heurísticas *Multi-Start* para resolver o 2E-CVRP. No método, cada nível foi tratado como um subproblema e resolvido separadamente e sequencialmente, num processo iterativo, com o uso de heurísticas de *clustering* e abordagem de busca local. O 1º nível foi tratado como um VRP e o 2º nível como vários VRPs, todos resolvidos pelo método de *Branch and Cut*. Os autores buscaram comparar as heurísticas desenvolvidas entre si e com as duas *math-heuristics* apresentadas por Perboli, Tadei e Vigo (2008) e, para isso, utilizaram instâncias de pequeno e médio porte, com 2 satélites e 21 a 32 clientes e com 2 a 5 satélites e 50 clientes, respectivamente. Os resultados demonstraram que o método de heurísticas *Multi-Start* obteve melhores resultados comparados com as *math-heuristics*, tanto na qualidade da solução como na eficiência computacional.

Um algoritmo híbrido *Ant Colony Optimization* foi desenvolvido por Meihua *et al* (2011) a partir da combinação de três meta-heurísticas para a resolução do 2E-CVRP. O método resolve o problema dividindo-o em subproblemas CVRPs e as meta-heurísticas *Ant Colony Optimization* e *Multiple Neighborhood Descent* são combinadas para a resolução desses CVRPs. Em seguida, a meta-heurística *Threshold-Based Local Search* é utilizada para melhorar a solução viável encontrada anteriormente. O método resolveu instâncias de referência com tamanho entre 20 e 50 nós e foi comparado aos trabalhos de Feliu *et al.* (2007) e Crainic *et al.* (2008). Em relação ao trabalho de Feliu *et al.* (2007), o algoritmo apresentou 6 melhores e 4 mesmas soluções para 21 instâncias testadas. Comparado ao trabalho de Crainic *et al.* (2008), o algoritmo apresentou 6 melhores e 1 mesma solução para 12 instâncias testadas.

Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012) resolveram o 2E-CVRP no contexto da Logística Urbana com o desenvolvimento de uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS). O método foi testado com instâncias de referência na literatura do 2E-CVRP e do *Location Routing Problem*. Para o 2E-CVRP, os resultados apresentaram 59 novas melhores soluções para 93 instâncias testadas, se comparados aos trabalhos de Perboli e Tadei (2010), Perboli, Tadei e Vigo (2011) e Crainic *et al.* (2010).

Crainic *et al* (2012) solucionaram o 2E-CVRP com o uso de meta-heurísticas baseadas em *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) combinado com *Path Relinking*. O método foi testado em instâncias com até 5 satélites e 50 clientes e comparado com os resultados encontrados em Perboli e Tadei (2010) e Perboli, Tadei e Vigo (2011). As comparações mostraram que os resultados advindos dessa meta-heurística podem ser melhores em eficiência do que os resultados obtidos por Perboli, Tadei e Vigo (2011). Em relação à performance computacional, a meta-heurística apresentou menores tempos de processamento que os métodos propostos por Perboli e Tadei (2010) e Perboli, Tadei e Vigo (2011).

Mancini (2013) revisou os problemas de roteamento existentes na literatura de Logística Urbana envolvendo *multi-echelon distribution systems* (ME-DS), inclusive o 2E-CVRP e os métodos utilizados para sua resolução.

Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013) propuseram uma heurística *brand-and-cut* a

partir dos modelos desenvolvidos por Feliu *et al.* (2007) e Perboli, Tadei e Vigo (2011) para o 2E-CVRP. O algoritmo passou a considerar custos fixos para as rotas dos dois níveis e para os satélites capacitados. O método foi testado com 93 instâncias e foi capaz de resolver 47 de maneira ótima.

Baldacci, Mingozzi e Roberti (2013) desenvolveram um modelo matemático com base em programação dinâmica (PD), em um método *dual-ascent* e um algoritmo exato para resolver o 2E-CVRP. O algoritmo decompõe o 2E-CVRP em um conjunto limitado de *Multi depot Capacitated Vehicle Routing Problem* (MDCVRP), com restrições laterais, sendo encontrada a solução para o 2E-CVRP ao se resolver o conjunto de MDCVRP. O método foi testado em 207 instâncias, sendo 153 advindas da literatura e consideravam o custo de manuseio igual a zero e as outras 54 instâncias criadas pelos próprios autores para testar o método para custos de manuseio diferentes de zero. Testes foram feitos com até 100 clientes e 6 satélites e, em média, seus resultados se mostraram melhores se comparados aos trabalhos de Perboli, Tadei e Vigo (2011) e Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013).

Santos, Da Cunha e Mateus (2013) desenvolveram, a partir do modelo matemático apresentado por Perboli, Tadei e Vigo (2011), uma reformulação da Programação Inteira para o 2E-CVRP e implementaram duas heurísticas *Branch-and-price* (BP). Uma heurística satisfaz a condição elementar do 2E-CVRP de que cada cliente é visitado apenas uma vez e foi chamada de BP-E, enquanto a outra heurística não satisfaz essa condição elementar e foi chamada de BP-NE. O método foi testado para 114 instâncias de referência para o VRP e o 2E-CVRP, com 1 único depósito e até 51 nós ao todo. Como resultado, o método gerou 2 novas soluções ótimas e 10 novos melhores *upper bounds* de referência. A heurística BP-E mostrou-se capaz de chegar a melhores soluções inteiras e a heurística BP-NE apresentou menores *gaps*, quando determinado o tempo limite para resolução do problema. Além disso, a heurística BP-NE se mostrou mais rápida que a heurística BP-E e a heurística *Branch-and-cut* desenvolvida por Perboli, Tadei e Vigo (2011).

Grangier *et al.* (2014) abordaram uma nova classe do 2E-CVRP com PLIM, chamada *two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization* (2E-MTVRP-SS) e utilizaram uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* para resolução do problema. O trabalho desses autores serve

como contribuição para outros problemas de roteamento envolvendo restrições de sincronização.

Zheng *et al.* (2014) desenvolveram uma heurística híbrida, composta de GRASP e de uma *Variable Neighborhood Descent* (VND) para resolução e melhoria da solução, respectivamente, do 2E-CVRP. Com o uso de três grupos de instâncias de referência, o algoritmo foi comparado a valores de referências publicados em Baldacci, Mingozzi e Roberti (2013) e com a meta-heurística ALNS proposta por Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012) e apresentou os mesmos valores ou valores superiores, tanto em qualidade da solução como em tempo de execução do problema.

Sitek e Wikarek (2014), baseados no modelo de Perboli, Tadei e Vigo (2011), desenvolveram uma nova abordagem para a modelagem e resolução do 2E-CVRP ao integrar PLIM e Programação Lógica por Restrições (PLR). O modelo integrado proposto e o modelo de PLIM foram testados para 66 instâncias de referência do CVRP, com 1 depósito, 2 satélites e 12 clientes. Os resultados da abordagem integrada foram comparados com os resultados do modelo de PLIM para as mesmas instâncias, o que mostrou que a abordagem integrada possibilita encontrar soluções com mais rapidez, devido à redução do problema combinatório.

Soysal, Bloemhof-Ruwaard e Bektas (2014) abordam pela primeira vez a variação *time-dependent* em problemas 2E-CVRP, o *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Dependent* (2E-CVRPTD), assim como fatores que influenciam no consumo de combustível, como o tipo de veículo, a distância percorrida, a velocidade e a carga transportada pelo veículo. Esses autores desenvolveram um modelo baseado em PLIM baseada no modelo proposto por Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013) e testaram o modelo em um caso real, uma cadeia de suprimentos localizada nos Países Baixos, com 1 depósito, 2 satélites e 16 clientes. A demanda foi gerada de maneira randômica e os dados sobre distâncias e tráfego foram calculados e obtidos a partir do *Google Maps*. Os autores definiram quatro indicadores chave de desempenho (ICP): distância total, tempo total, combustível consumido total e custo total. O problema foi modelado para cada ICP, de maneira que a função objetivo era diferente para cada indicador, mas as restrições eram as mesmas, e os resultados foram comparados. A análise dos

resultados mostrou que as rotas resultantes e a desempenho da solução pode mudar de acordo com o indicador considerado e que os indicadores tradicionais de minimização de distância e de tempo podem não resultar em minimização de custos e de consumo de combustível. Outra consideração importante é que a minimização do indicador de combustível pode resultar em aumento do custo total. Dois cenários foram propostos pelos autores para analisar o comportamento dos ICPs a partir da variação do custo de operação. Um terceiro cenário foi proposto para comparação entre os valores dos ICPs do sistema 2E-CVRP e de um sistema de entrega direta. O 2E-CVRP apresentou redução da distância total percorrida, do tempo total de viagem e de combustível total consumido e melhor desempenho para o custo total.

Cuda, Guastaroba e Speranza (2015) fizeram um estudo da arte sobre *Two-echelon Routing Problems*, em que abordaram oito principais artigos da classe 2E-CVRP, visto que este é o mais básico e estudado problema dessa classe.

Um resumo dessa revisão da literatura é apresentado na Tabela 1. A coluna ‘Artigo’ identifica a referência de cada artigo analisado. A coluna ‘Variação’ informa a variação do problema de roteamento de veículos que é tratada no artigo. A coluna ‘Método’ indica o método abordado no artigo, e se subdivide em 5 outras colunas: ‘Mod. Mat.’, ‘Heurística’, ‘Meta-heurística’, ‘*Math-heuristic*’ e ‘Revisão’, e indicam se o artigo abordou modelagem matemática, heurística, meta-heurística, *math-heuristic* e/ou estudo de arte em seu trabalho, respectivamente.

Tabela 1 – Artigos 2E-VRP

(continua)

Artigo	Variação	Método				
		Mod. Mat.	Heurística	Meta-heurística	Math-heuristic	Revisão
Feliu et al. (2007)	2E-CVRP	■				
Perboli, Tadei e Vigo (2008)	2E-CVRP	■			■	
Crainic et al. (2008)	2E-CVRP			■		
Crainic, Ricciardi e Storchi (2009)	2SS-MDMT-VRPTW	■				
Crainic et al. (2010)	2E-CVRP		■			
Perboli, Tadei e Vigo (2011)	2E-CVRP	■			■	

Tabela 1 – Artigos 2E-VRP

(continuação e conclusão)

Autor	Variação	Método				
		Mod. Mat.	Heurística	Meta-heurística	Math-heuristic	Revisão
Meihua et al. (2011)	2E-CVRP			■		
Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012)	2E-CVRP			■		
Crainic al. (2012)	2E-CVRP			■		
Mancini (2013)	ME-DS					■
Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013)	2E-CVRP		■			
Baldacci, Mingozzi e Roberti (2013)	2E-CVRP	■				
Santos, Da Cunha e Mateus (2013)	2E-CVRP	■	■			
Grangrier et al. (2014)	2E-MTVRP-SS	■		■		
Zeng et al. (2014)	2E-CVRP		■			
Sitek e Wikarek (2014)	2E-CVRP	■				
Soysal, Bloemhof-Ruwaard e Bektas (2014)	2E-CVRPTD	■				
Cuda, Guastaroba e Speranza (2015)	2E-CVRP					■

Fonte: Elaborado pela autora.

2.2 LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS

Termos e definições a respeito de logística reversa relacionados à reciclagem apareceram na literatura científica na década de 70. No Brasil, a logística reversa surgiu na década de 90 como um novo conceito de logística empresarial (LAGARINHOS e TENÓRIO, 2013).

Logística reversa é uma área responsável pelo planejamento, operação, controle de fluxo e das informações logísticas correspondentes do retorno de bens de pós-venda

e de pós-consumo por meio de Canais de Distribuição Reversos e tem como objetivo estratégico agregar valor a esses bens, seja econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros. Por Canais de Distribuição Reversos entendem-se as diversas alternativas desde a captação até a reutilização de produtos pós-consumos ou de resíduos industriais, ou ainda, até o reaproveitamento de seus materiais. Assim, enquanto a logística tradicional cuida do fluxo de uma cadeia de suprimentos no sentido “jusante”, a logística reversa vai tratar do fluxo no sentido “montante”, ou seja, dos fluxos materiais do final do processo produtivo para o início (LEITE, 2000, 2002; PIRES, 2009).

Os bens de pós-venda e de pós-consumo diferenciam-se de acordo com a fase do ciclo de vida útil do bem retornado. Os bens de pós-venda caracterizam-se como produtos que retornam de diferentes elos da cadeia de distribuição direta por razões comerciais, erros no processamento de pedidos, garantia dada pelo fabricante, defeitos ou falhas de funcionamento do produto, avarias no transporte, entre outros motivos. Já os bens de pós-consumo consistem em produtos que alcançaram o fim de sua vida útil, em produtos usados que tenham possibilidade de utilização e nos resíduos industriais em geral. Os bens de pós-consumo podem fluir por canais reversos de Reuso, Desmanche, Reciclagem até a destinação final (LEITE, 2002).

Os pneus inservíveis, bens de pós-consumo, eram dispostos em lixões ou pilhas a céu aberto após o fim de sua vida útil até a década de 70, quando surgiram estudos e legislações a fim de propor uma destinação adequada aos pneus inservíveis. Atualmente, essa destinação é regulamentada no Brasil por meio das Resoluções nº 258/1999, nº 301/2002 e nº 416/2009 do CONAMA e pela PNRS (ANIP, 2015; BRASIL, 2010; CONAMA 1999, 2002, 2009), descritas na Seção 2.2.1.

2.2.1 Legislação acerca de pneus inservíveis

A Lei nº 12.305/2010 que instituiu a PNRS é uma legislação brasileira que define quais produtos são considerados como resíduos sólidos, dentre eles os pneus inservíveis, quem está sujeito à elaboração do plano de gerenciamento de resíduos sólidos e o conteúdo mínimo que este deve ter, como metas de redução, reutilização e reciclagem de rejeitos, a definição de normas para a sua disposição final, medidas de controle e fiscalização, entre outras (BRASIL, 2010).

Especificamente a respeito de pneus inservíveis, a Resolução nº 258/1999 e a Resolução nº 301/2002, que altera dispositivos da Resolução nº 258/1999, determinam que os fabricantes e os importadores de pneumáticos são responsáveis pela coleta e destinação final ambientalmente adequada dos pneus inservíveis, sendo que os distribuidores, os revendedores, os reformadores, os consertadores, e os consumidores finais de pneus devem colaborar junto aos fabricantes, aos importadores e ao Poder Público na implementação da coleta de pneus inservíveis existentes no país. Essas resoluções também determinam prazos e quantidades para a coleta e destinação final ambientalmente correta de pneus inservíveis.

Complementar às Resoluções nº 258/1999 e nº 301/2002, a Resolução nº 416/2009 do CONAMA prevê a elaboração de um plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação de pneus inservíveis (PGP) e o seu conteúdo, além de também determinar a necessidade de prevenção à degradação ambiental e destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis e informas as providências a respeito de quantidades e responsabilidades (CONAMA, 2009).

Essa Resolução determina que os fabricantes e importadores sejam os responsáveis pela realização da coleta e destinação adequada de pneus inservíveis, assim como a elaboração de um PGP e a definição e divulgação de pontos de coleta de pneus usados. Os fabricantes e importadores devem implantar pelo menos um ponto de coleta em municípios com mais de 100 mil habitantes e atender os demais municípios por meio de um sistema definido no PGP. Eles são responsáveis também pela promoção de estudos e pesquisas a respeito de técnicas de reutilização e reciclagem, além de serem responsáveis por educar os consumidores a entregar pneus usados nos pontos de coleta. Além disso, os comerciantes são obrigados a armazenar pneus usados após a troca por novos, ou ainda, a servir como ponto de coleta (CONAMA, 2009).

3 METODOLOGIA

É importante, para toda pesquisa, que um projeto seja elaborado e estruturado, visto que será o roteiro no qual o trabalho será realizado e, além disso, é uma espécie de documento e poderá ser útil a outros pesquisadores ou interessados no assunto (GIL, 2002). Por isso, este capítulo se destina a apresentar a maneira como a pesquisa foi planejada e realizada, além de classificá-la para melhor entendimento da mesma. No entanto, deve-se considerar que a taxonomia da pesquisa pode variar de acordo com o autor e os critérios utilizados por ele (VERGARA, 2011).

3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO TIPO DE PESQUISA

Esta pesquisa foi classificada de acordo com Silva e Menezes (2001), que propuseram uma taxonomia quanto à natureza da pesquisa, à forma de abordagem, aos objetivos e os procedimentos técnicos adotados, Figura 4.

Figura 4 – Classificação da pesquisa

Natureza	• Aplicada
Abordagem	• Quantitativa
Objetivos	• Exploratória
Procedimentos	• De laboratório

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à natureza desta pesquisa, ela pode ser definida como aplicada, pois visa à produção de conhecimento a partir da implementação do 2E-CVRP, que será

aplicado a um problema, a coleta de pneus inservíveis.

A forma de abordagem desta dissertação é quantitativa, visto que busca produzir números e estimativas para analisar as informações. No caso, o valor da função objetivo, que é o custo total de transporte e de operação, serve de parâmetro para comparação entre cenários; o tempo de execução do modelo possibilita a comparação entre diferentes modelos e *softwares* de otimização; e o fluxo de carga que flui em cada nó por meio de veículos permite analisar a eficácia do modelo em relação às restrições.

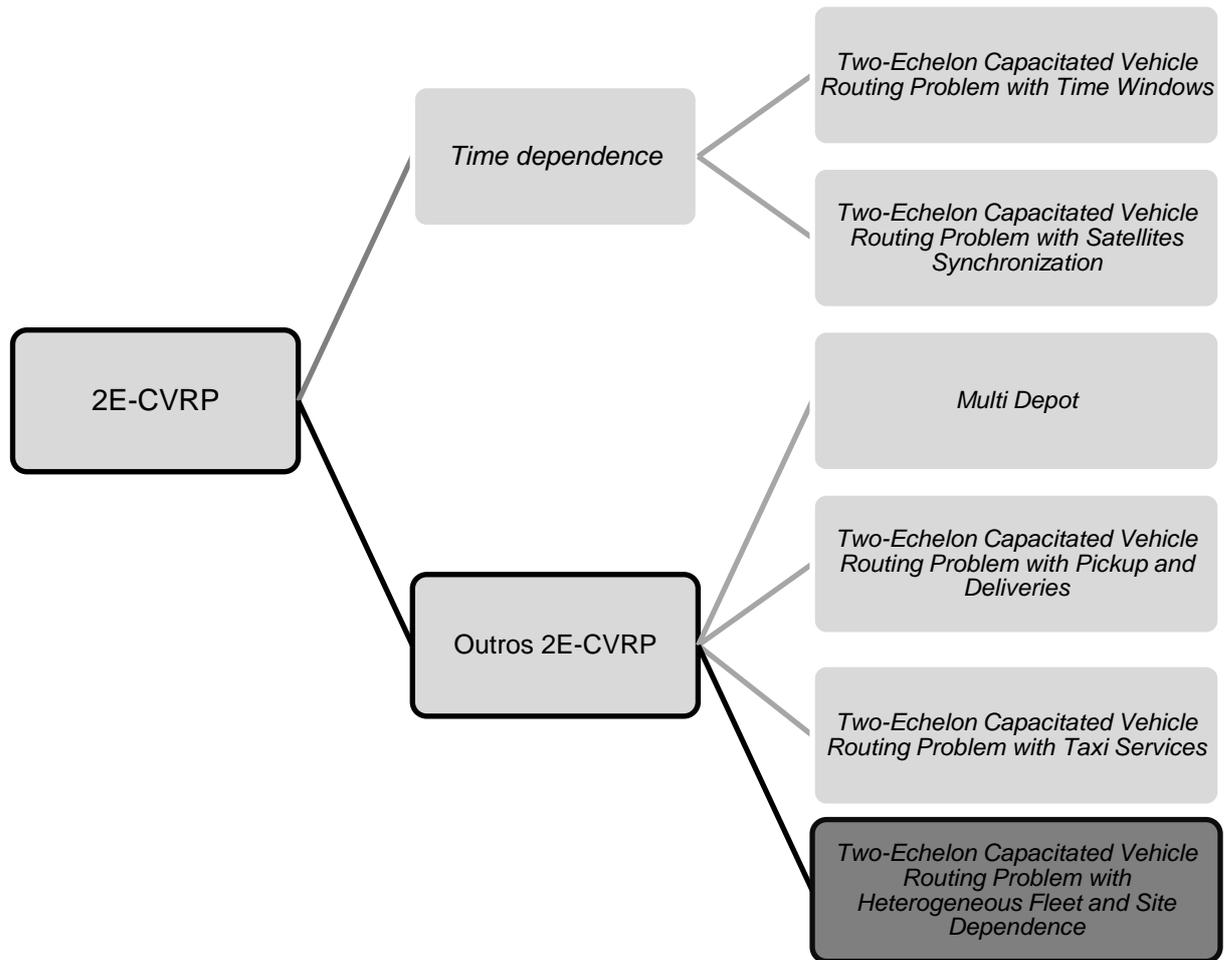
Em se tratando de objetivos, esta dissertação se classifica como exploratória, já que busca maior familiaridade com o problema de roteamento de veículos em dois níveis e com a gestão da logística reversa, a partir de análises de exemplos parecidos, encontrados na literatura, para melhor compreensão do problema.

Por fim, em relação aos seus procedimentos técnicos, esta pesquisa é classificada de acordo com Vergara (2011) como sendo de laboratório, pois por meio da modelagem matemática e de softwares de otimização é possível propor cenários impossíveis de simular no campo.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO QUANTO AOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO

De acordo com a taxonomia apresentada por Perboli, Tadei e Vigo (2011), o modelo proposto consiste em uma nova variação dos problemas de roteirização em dois níveis, com frota heterogênea no 2º nível e restrições de capacidade dos satélites, dos veículos e de acesso ao cliente, Figura 5.

Figura 5 – Classificação do modelo matemático proposto segundo Perboli, Tadei e Vigo (2011)

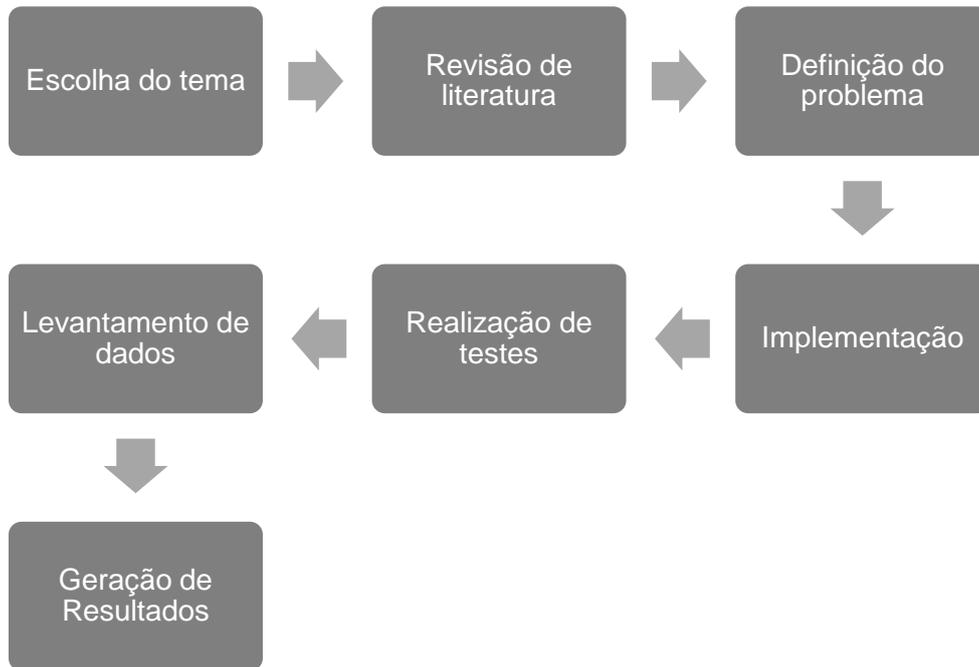


Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 ETAPAS DA METODOLOGIA DA PESQUISA

A fim de alcançar os objetivos da pesquisa, foi definida uma metodologia para a realização deste trabalho que consiste em sete fases e 12 etapas, adaptado dos modelos de Silva e Menezes (2001) e Mapa (2007), que são descritas a seguir, Figura 6.

Figura 6 – Etapas da Metodologia da Pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

- Fase I: Escolha do tema
 - 1- Escolher um tema dentro do problema de roteamento de veículos a partir de pesquisa sobre as variações desse modelo – foi escolhido o 2E-CVRP.
- Fase II: Revisão de literatura
 - 2- Pesquisar artigos científicos publicados na área do 2E-CVRP com o objetivo de verificar o que já foi publicado e as lacunas existentes na área.
 - 3- Escolher uma modelagem matemática que sirva de base para o desenvolvimento do trabalho
- Fase III: Definição do problema
 - 4- Definir o problema a ser implementado pelo modelo matemático proposto com base no modelo escolhido na Etapa 3.
- Fase IV: Implementação
 - 5- Implementar o modelo para o 2E-CVRP com o uso do *solver* IBM ILOG CPLEX 12.6.

- Fase V: Realização de Testes
 - 6- Definir instâncias de teste para os parâmetros: quantidade de satélites e clientes, matriz de distância, tamanho e capacidade das frotas homogênea (1º nível) e heterogênea (2º nível), capacidade dos satélites, custos de transporte e de operação, demanda e restrições de acesso dos clientes.
 - 7- Testar o modelo com as instâncias definidas.

- Fase VI: Levantamento de dados
 - 8- Coletar os dados necessários à resolução do problema.
 - 9- Definir instâncias para comparação.

- Fase VII: Geração de Resultados
 - 10- Gerar resultados com a aplicação dos dados coletados na Fase VII no modelo implementado na Fase VI.
 - 11- Comparar resultados de diferentes instâncias.
 - 12- Analisar os resultados encontrados nas Etapas 14 e 15.

3.4 PROBLEMA REAL DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS ANALISADO

Esta dissertação concentra-se na resolução do problema de roteamento em dois níveis da cadeia logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, Brasil. Para isso, foram determinados possíveis cenários para essa cadeia, levando em consideração futuras possíveis expansões da empresa recicladora e a obrigação da responsabilidade compartilhada definida na PNRS e na Resolução nº 416/2009 do CONAMA (BRASIL, 2010; CONAMA, 2009).

A logística reversa de pneus proposta tem início com a necessidade de descarte do pneu pelo consumidor após o fim de sua vida útil. Esse descarte pode ocorrer com o encaminhamento do pneu para pontos de venda, borracheiros ou para pontos de coleta. Os pontos de venda de pneus e os borracheiros são responsáveis por encaminhar os pneus inservíveis recebidos para os pontos de coleta, onde esses pneus serão encaminhados a empresa recicladora de pneus, localizada em Linhares, Espírito Santo, que está em fase de implantação e utilizará os pneus para serem queimados e, assim, gerar energia elétrica.

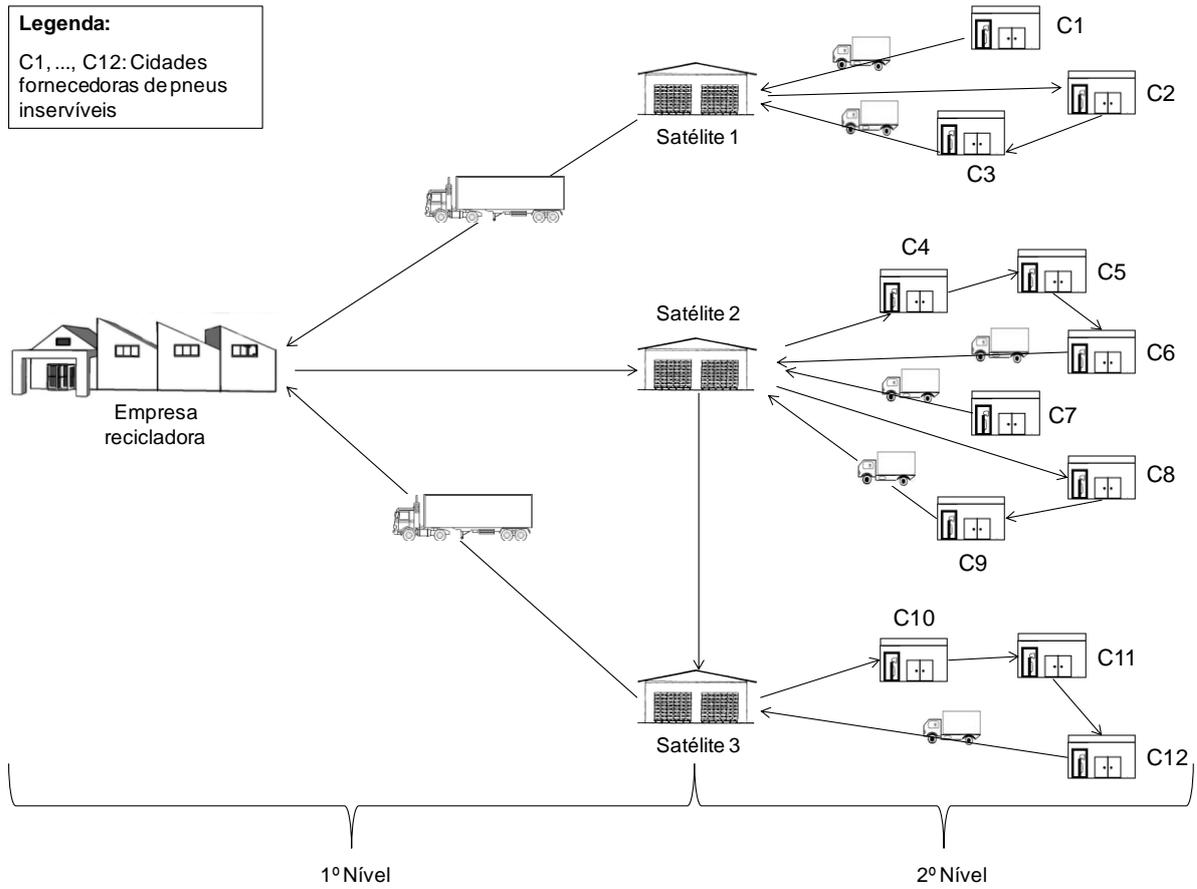
A cadeia logística reversa foi considerada a partir dos pontos de coleta até a empresa recicladora e foi considerada a existência de CDUs para consolidação de cargas entre os pontos de coleta e a empresa recicladora. Dessa forma, considerou-se que os pontos de coleta seriam locais para onde o consumidor, os borracheiros e os comerciantes encaminhariam pneus inservíveis. Os CDUs seriam responsáveis pela consolidação dos pneus coletados em vários pontos de coleta e pelo transporte desses pneus à empresa recicladora.

Assim, fazendo um paralelo entre a cadeia reversa do pneu e o sistema de distribuição *two-echelon*, pode-se definir que a empresa recicladora de pneus foi considerada como o depósito, os CDUs como os satélites e os pontos de coleta como os clientes. A cadeia proposta foi modelada em dois níveis e é ilustrada na Figura 7:

- 1º nível: composto pela empresa recicladora/depósito e pelos CDUs/satélites;
- 2º nível: composto pelos CDUs/satélites e os pontos de coleta/clientes.

Dessa forma, no 2º nível, veículos vazios partem dos satélites e visitam cada cidade cliente, onde coletam pneus inservíveis, e voltam ao satélite de origem. Só depois disso, o fluxo no 1º nível se inicia. No 1º nível, veículos vazios partem da empresa recicladora em direção aos pontos de coleta, onde coletam os pneus inservíveis processados, e retornam à empresa recicladora para que seja realizada a reciclagem desses pneus. Nos satélites é realizada a consolidação nos veículos do 1º nível dos pneus coletados pelos veículos do 2º nível.

Figura 7 – Representação da rede de logística reversa do pneu



Fonte: Elaborado pela autora.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

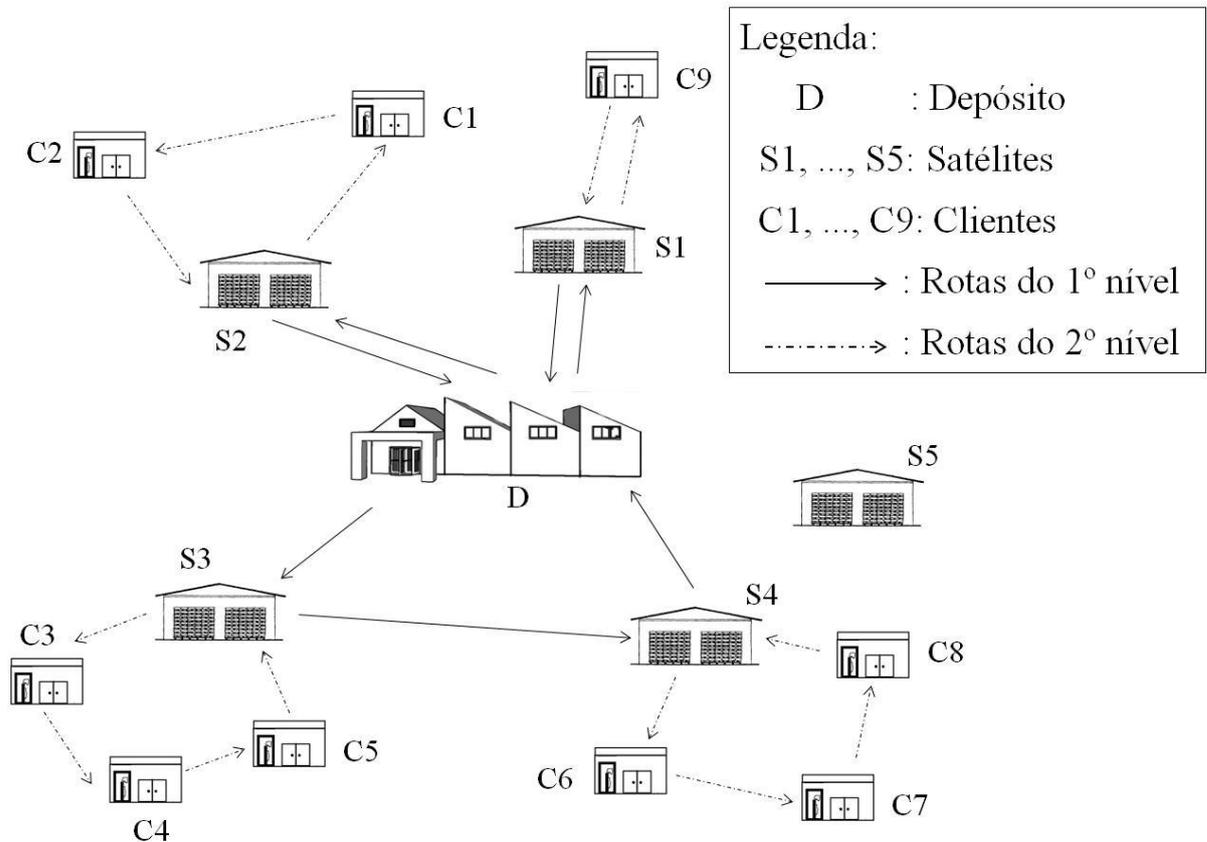
O 2E-CVRP-HFSD é um problema de coleta em dois níveis composto por um depósito, um número fixo e conhecido de depósitos intermediários, chamados satélites, e um número conhecido de clientes. O 1º nível é composto pelo depósito e pelos satélites e o 2º nível pelos satélites e clientes. O depósito possui uma frota homogênea de veículos, chamados de veículos do 1º nível, enquanto cada satélite possui uma frota heterogênea, com veículos do 2º nível. A localização dos satélites é conhecida e diferentes satélites podem ter diferentes capacidades, que são dadas pela capacidade total de sua frota. As rotas do 2º nível iniciam-se com veículos do 2º nível partindo dos satélites em direção aos clientes, a fim de coletar produtos pós-consumo.

Cada cliente deve ser visitado somente uma vez. Após todos os clientes serem visitados, os veículos do 2º nível retornam ao satélite de origem. As rotas do 1º nível iniciam-se com veículos do 1º nível partindo do depósito em direção aos satélites para a coleta dos produtos recolhidos no 2º nível. Podem ser realizadas, neste nível, coletas fracionadas.

Nos satélites, os veículos do 2º nível são descarregados e ocorre o carregamento dos veículos do 1º nível, a um custo proporcional à quantidade de carga manuseada, portanto, considera-se a coleta de apenas um tipo de produto. Por fim, após os veículos do 1º nível serem carregados, os mesmos devem retornar ao depósito para que seja dada uma destinação final adequada aos produtos coletados. O 2E-CVRP-HFSD apresenta restrições de capacidade dos veículos das frotas dos dois níveis, restrições de capacidade dos satélites e restrições de acesso de certos tipos de veículos a alguns pontos de coleta, conforme Figura 8.

O modelo tem como objetivo a determinação de rotas para os dois níveis do problema e dos satélites a serem utilizados, de maneira que as restrições de capacidade dos veículos, dos satélites e de acesso sejam respeitadas, com a minimização do custo de coleta nos dois níveis, sendo esse custo composto pelo custo de transporte fixo e variável nas rotas do 1º e do 2º níveis e do custo de operação em cada satélite.

Figura 8 – Distribuição 2E-CVRP



Fonte: Elaborado pela autora.

Formalmente, o 2E-CVRP-HFSD pode ser definido como um grafo não orientado $G = (V, E)$, onde o conjunto de vértices V é definido como sendo $V = \{D \cup S \cup C\}$. O conjunto $D = \{0\}$ representa o depósito, o conjunto S representa os satélites e o conjunto C representa os clientes. O conjunto E é definido como sendo $E = \{W \cup X\}$ e representa as arestas que interligam os vértices, sendo $W = \{D \cup S\}$ e $X = \{S \cup C\}$.

O modelo é, ainda, composto pelos seguintes conjuntos:

Y : conjunto dos veículos do 1º nível;

Z : conjunto dos veículos do 2º nível;

K : representa os diversos tipos de veículos do 2º nível.

São parâmetros do modelo:

a : quantidade de satélites;

b : quantidade de clientes;

ψ : o número de tipos de veículos $z \in Z$ do 2º nível;
 f_z : tipo $k \in K$ do veículo $z \in Z$;
 g_{ik} : parâmetro que tem o valor de 1 caso o cliente $i \in C$ possa ser atendido pelo veículo do tipo $k \in K$ e 0, caso contrário;
 l : capacidade dos veículos $y \in Y$, sendo que no 1º nível a frota é homogênea e, portanto, a capacidade é igual para todos os veículos;
 λ_z : capacidade de cada veículo $z \in Z$;
 d_i : demanda por coleta de cada cliente $i \in C$;
 M : parâmetro para a lógica do modelo que assume um valor suficientemente grande;
 o_{ij} : custo em R\$ de percorrer o arco $(i, j) \in W$ do 1º nível;
 p_{ij} : comprimento, em quilômetro, do arco $(i, j) \in X$ do 2º nível;
 q_z : custo por quilômetro percorrido no 2º nível do veículo $z \in Z$;
 h_s : custo de operação no satélite $s \in S$;
 e : custo fixo de transporte para cada veículo $y \in Y$;
 u_z : custo fixo de transporte do veículo $z \in Z$;
 r_z : indica a qual satélite $s \in S$ pertence o veículo $z \in Z$, cada satélite possui uma frota de veículos dedicada que só pode servir aos clientes desse satélite;
 t_s : número máximo de veículos $z \in Z$ utilizados pelo satélite $s \in S$, cada satélite possui uma frota de t_s veículos definida para atender seus clientes e que ser compartilhada com outros satélites.

O modelo possui dois grupos de variáveis de decisão: um grupo de variáveis para cada nível do problema. A seguir, são apresentadas as variáveis do primeiro grupo relativas ao 1º nível.

α_{ijy} : variável binária que possui valor igual a 1 se um veículo $y \in Y$ percorrer um arco $(i, j) \in W$, caso contrário seu valor é 0;
 η_{sy} : quantidade de carga coletada no satélite $s \in S$ por um veículo $y \in Y$ vindo do depósito;
 μ_{sy} : define a posição do satélite $s \in S$ na rota do veículo $y \in Y$.

Continuando a definição das variáveis, são apresentadas as variáveis do segundo grupo relativas ao 2º nível.

ϕ_{ijsz} : representa a carga de um veículo $z \in Z$ ao chegar no nó $j \in X$ vindo do nó $i \in X$. Refere-se à rota do veículo $z \in Z$ iniciada no satélite $s \in S$.

β_{ijsz} : variável binária que possui valor igual a 1 se o veículo $z \in Z$ percorre um arco $(i, j) \in X$, considerando que ele inicia sua rota em um satélite $s \in S$, e possui valor 0, caso contrário;

τ_s : total de carga coletada nos clientes do 2º nível que são direcionadas para o satélite $s \in S$.

σ_z : variável binária que possui valor igual a 1 se um veículo $z \in Z$ é utilizado e possui valor 0 em caso contrário.

Com base nos conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão apresentados, a função objetivo e as restrições do modelo 2E-CVRP-HFSD proposto são apresentadas a seguir. As Restrições (2) a (10) são restrições relacionadas ao 1º nível do problema (depósito e satélites) e as Restrições (11) a (21) são as restrições que tratam do 2º nível do problema.

Função Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & \sum_{y \in Y} \sum_{(i,j) \in W} o_{ij} \alpha_{ijy} + \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in X} \sum_{z \in Z} q_z p_{ij} \beta_{ijsz} + \sum_{s \in S} h_s \tau_s \\ & + e \sum_{y \in Y} \sum_{j \in W} \alpha_{0jy} + \sum_{z \in Z} \sigma_z u_z \end{aligned} \quad (1)$$

Restrições

$$\sum_{j \in W} \alpha_{sjy} - \sum_{i \in W} \alpha_{isy} = 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} \alpha_{sjy} \leq 1 \quad \forall s \in W, y \in Y \quad (3)$$

$$\mu_{iy} + 1 \leq \mu_{jy} + (1 - \alpha_{ijy}) M \quad \forall (i, j) \in S, y \in Y \quad (4)$$

$$\mu_{sy} \geq 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (5)$$

$$\mu_{sy} \leq a \sum_{j \in W} \alpha_{sjy} \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (6)$$

$$\eta_{sy} \leq l \sum_{j \in W} \alpha_{sjy} \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (7)$$

$$\sum_{s \in S} \eta_{sy} \leq l \quad \forall y \in Y \quad (8)$$

$$\sum_{y \in Y} \eta_{sy} = \tau_s \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{i \in X} \beta_{sisz} \leq \sum_{j \in W} \sum_{z \in Y} \alpha_{sjz} \quad \forall s \in S, z \in Z \quad (10)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{\{j \in X \mid j \neq (i+a)\}} \sum_{\{z \in Z \mid r_z = s\}} \beta_{(i+a)jsz} = 1 \quad \forall i \in C \quad (11)$$

$$\sum_{\{j \in X \mid j \neq (i+a)\}} \beta_{j(i+a)sz} - \sum_{\{j \in X \mid j \neq (i+a)\}} \beta_{(i+a)jsz} = 0 \quad \forall i \in C, s \in S, z \in Z \quad (12)$$

$$\sum_{\{m \in S \mid m \neq s\}} \left(\sum_{i \in C} \beta_{s(i+a)mz} + \sum_{i \in C} \beta_{(i+a)smz} \right) = 0 \quad \forall s \in S, z \in Z \quad (13)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{z \in Z} \beta_{s(i+a)sz} \leq t_s \quad \forall s \in S \quad (14)$$

$$\sum_{\{s \in S \mid s \neq j\}} \sum_{j \in X} \sum_{z \in Z} \beta_{sjsz} \leq \psi \quad (15)$$

$$\sum_{\{s \in S \mid s \neq j\}} \sum_{j \in X} \beta_{sjsz} \leq 1 \quad \forall z \in Z \quad (16)$$

$$\sigma_z = \sum_{\{s \in S \mid s \neq j\}} \sum_{j \in X} \beta_{sjsz} \quad \forall z \in Z \quad (17)$$

$$\sum_{\{s \in S | r_z = s\}} \sum_{\{j \in X | j \neq (i+a)\}} \phi_{(i+a)jsz} \geq \left(\left(\sum_{\{s \in S | r_z = s\}} \sum_{\{j \in X | j \neq (i+a)\}} \beta_{(i+a)jsz} \right) - 1 \right) M \quad \forall i \in C, z \in Z \quad (18)$$

$$+ d_i + \sum_{\{s \in S | r_z = s\}} \sum_{\{j \in X | j \neq (i+a)\}} \phi_{j(i+a)sz} \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z, r_z = s \quad (19)$$

$$\tau_s = \sum_{i \in C} \sum_{z \in Z} \phi_{(i+a)ssz} \quad \forall s \in S \quad (20)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{j \in X} \beta_{j(i+a)sz} = 0 \quad \forall i \in C, z \in Z, k \in K, g_{ifz} = 0 \quad (21)$$

$$\eta_{sy} \geq 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (22)$$

$$\mu_{sy} \geq 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (23)$$

$$\phi_{ijsz} \geq 0 \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z \quad (24)$$

$$\tau_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (25)$$

$$\alpha_{ijy} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in W, y \in Y \quad (26)$$

$$\beta_{ijsz} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z \quad (27)$$

A função objetivo, Equação (1), representa o custo total de distribuição do sistema e deve ser minimizada. A primeira parcela dessa Equação (1) representa o custo das viagens realizadas através dos arcos $(i, j) \in W$, enquanto a segunda parcela da Equação (1) representa as viagens realizadas através dos arcos $(i, j) \in X$. A terceira parcela da Equação (1) quantifica o custo de carregamento e descarregamento h_s das cargas em cada satélite $s \in S$. Por fim, a quarta e quinta parcela da Equação (1) representam o custo fixo de transporte total dos veículos de 1º nível e de 2º nível, respectivamente.

As Restrições (2) asseguram a conservação de fluxo de veículos $y \in Y$ em cada satélite $s \in S$. As Restrições (3) garantem que um veículo $y \in Y$ visita um satélite $s \in S$ no máximo uma vez. As Restrições (4), (5) e (6) evitam a formação de *subtour* no 1º nível. As Restrições (7) e (8) impedem que a capacidade l dos veículos $y \in Y$ seja excedida. As Restrições (9) estabelecem que toda carga que chega a um satélite $s \in S$ deve ser distribuída por esse satélite. As Restrições (10) impedem que um satélite $s \in S$ não utilizado no roteamento do 1º nível seja utilizado no roteamento do 2º nível.

As Restrições (11) garantem que todo cliente $i \in C$ seja atendido. As Restrições (12) determinam a conservação de fluxo de veículos $z \in Z$ em cada cliente $i \in C$. As Restrições (13) eliminam o tráfego entre satélites $s \in S$ no roteamento do 2º nível. As Restrições (14) restringem a quantidade de veículos $z \in Z$ utilizados para a distribuição de cargas de cada satélite $s \in S$ e a Restrição (15) garante que a quantidade total de veículos $z \in Z$ utilizados em todo o roteamento do 2º nível seja menor ou igual à quantidade ψ de veículos $z \in Z$.

As Restrições (16) limitam que cada veículo $z \in Z$ pode fazer no máximo uma viagem a partir de um satélite. As Restrições (17) indicam quais veículos do 2º nível foram utilizados no roteamento.

As Restrições (18) e (19) garantem que a capacidade λ_z dos veículos $z \in Z$ não seja excedida. As Restrições (20) obrigam que toda carga coletada por veículos $z \in Z$ pertencentes a um determinado satélite $s \in S$ deve ser entregue a esse satélite. As Restrições (21) asseguram que um veículo do 2º nível só pode atender um cliente se esse cliente estiver em um local que esse veículo pode percorrer.

As Restrições (22) a (27) determinam o domínio das variáveis, sendo η_{sy} , μ_{sy} , ϕ_{ijsz} e τ_s variáveis maiores ou iguais a zero e α_{ijy} e β_{ijsz} variáveis binárias.

5 OBTENÇÃO DOS DADOS

Foram definidos dois grupos de instâncias, cada um com onze instâncias: o Grupo 1, com as Instâncias 1 a 11 e o Grupo 2, com as Instâncias 12 a 22. Dentro de cada grupo, as instâncias foram definidas de maneira a possibilitar a análise da logística reversa com o aumento da quantidade de demanda atendida e o aumento da quantidade de satélites disponíveis para a resolução do problema.

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros das instâncias definidas no Grupo 1. A coluna ‘Inst.’ representa todas as instâncias definidas. A coluna ‘Capac. Dep.’ refere-se à capacidade do depósito em cada instância. A coluna ‘Qtd. Sat.’ indica a quantidade de satélites disponíveis em cada instância e a coluna ‘Qtd. Clientes’, a quantidade de clientes considerados em cada instância. A coluna ‘Demanda atendida’ indica a porcentagem da quantidade total de pneus inservíveis gerados no estado do Espírito Santo que serão coletados em cada instância. Por fim, as colunas ‘Veículos 1º nível’ e ‘Veículos 2º nível’ subdividem-se em duas colunas cada, ‘Tipo veículo’ e ‘Qtd. Veículos’, e indicam o tipo de veículo e a quantidade de cada tipo de veículo disponível no roteamento do 1º nível e do 2º nível, respectivamente.

Tabela 2 – Instâncias do Grupo 1

(continua)

Inst.	Capac. Dep. (pneus)	Qtd. Sat. (un)	Qtd. Clientes (un)	Demanda atendida (%)	Veículos 1º nível		Veículos 2º nível	
					Tipo veículo	Qtd. Veículos (un)	Tipo veículo	Qtd. Veículos (un)
1	3.840	2	3	34,6	1	2	2	4
2	4.800	2	4	43,1	1	2	2	4
3	5.760	2	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
4	5.760	3	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
5	5.760	4	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
6	6.720	2	10	64,3	1	3	2	7
							3	2
7	6.720	3	10	64,3	1	3	2	7
							3	2
8	6.720	4	10	64,3	1	3	2	7
							3	2

Tabela 2 – Instâncias do Grupo 1

(continuação e conclusão)

Inst.	Capac. Dep. (pneus)	Qtd. Sat. (un)	Qtd. Clientes (un)	Demanda atendida (%)	Veículos 1º nível		Veículos 2º nível	
					Tipo veículo	Qtd. Veículos (un)	Tipo veículo	Qtd. Veículos (un)
9	7.680	2	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6
10	7.680	3	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6
11	7.680	4	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6

Fonte: Elaborado pela autora.

O depósito está em fase de implantação e iniciará suas atividades com uma capacidade de reciclagem de 160 pneus por hora, ou 3.840 pneus por dia. Como essa capacidade inicial atenderia apenas 34,6% da demanda existente de pneus inservíveis no Estado, definida na Seção 5.1 a seguir, instâncias foram criadas considerando a geração mensal de pneus inservíveis por município do Espírito Santo e incrementos na capacidade inicial do depósito a fim de atender uma parcela maior de municípios, sendo que foi considerado um cliente por município, no máximo. A prioridade é o atendimento dos clientes com maior geração de pneus inservíveis por dia.

Os valores da capacidade do depósito sofreram incrementos, sendo que para a Instância 1, o valor da capacidade do depósito é a capacidade real da empresa recicladora de pneus; para a Instância 2, o valor da capacidade do depósito considera um incremento de 25% na capacidade real da empresa recicladora; as instâncias 3, 4 e 5 consideram um incremento de 50% na capacidade real do depósito; para as Instâncias 6, 7 e 8, a capacidade do depósito representa o valor da capacidade inicial do depósito acrescida de 75%; e as Instâncias 9, 10 e 11 consideram que a capacidade inicial do depósito foi dobrada.

O número de clientes sofreu variações de acordo com o incremento que a capacidade do depósito sofria, já que uma capacidade maior de reciclagem de pneus possibilitava o atendimento de mais clientes. A quantidade de satélites foi

definida de um mínimo de 2 satélites e sofreu incrementos a fim de auxiliar a análise da implantação de diferentes quantidades de satélites para uma mesma quantidade de clientes, com exceção das Instâncias com 3 e 4 clientes, em que a pequena quantidade de clientes torna não viável a utilização de mais que 2 satélites. A escolha da localização dos satélites foi feita a partir de uma análise qualitativa dos municípios que tinham estrutura para que suportasse a implantação de um satélite.

A quantidade de veículos foi definida de acordo com a demanda dos clientes de cada instância, de maneira que para uma mesma quantidade de clientes foi definida uma mesma quantidade de veículos, independentemente da quantidade de satélites disponíveis para a instância. Dessa maneira, para instâncias com mesma quantidade de clientes e diferentes quantidades de satélites, quanto maior fosse a quantidade de satélites menor seria a capacidade de cada um deles.

Nas instâncias do Grupo 2, os valores dos parâmetros foram definidos da mesma maneira que para as instâncias do Grupo 1, com exceção dos custos fixos de transporte para os veículos do 1º nível e do 2º nível, que tem valor igual a zero para as instâncias do Grupo 1 e valores diferente de zero para as instâncias do Grupo 2. Isso foi feito com a finalidade de avaliar os impactos dos custos fixos de transporte na determinação da rota e escolha dos veículos.

A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros das instâncias definidas no Grupo 2. A coluna 'Inst.' representa todas as instâncias definidas. A coluna 'Capac. Dep.' refere-se à capacidade do depósito em cada instância. A coluna 'Qtd. Sat.' indica a quantidade de satélites disponíveis em cada instância e a coluna 'Qtd. Clientes', a quantidade de clientes considerados em cada instância. A coluna 'Demanda Atendida' indica a porcentagem da quantidade total de pneus inservíveis gerados no estado do Espírito Santo que serão reciclados em cada instância. Por fim, as colunas 'Veículos 1º nível' e 'Veículos 2º nível' subdividem-se em duas colunas cada, 'Tipo Veículo' e 'Qtd. Veículos', e indicam o tipo de veículo e a quantidade de cada tipo de veículo disponível no roteamento do 1º nível e do 2º nível, respectivamente.

Tabela 3 – Instâncias do Grupo 2

Inst.	Capac. Dep. (pneus)	Qtd. Sat. (un)	Qtd. Clientes (un)	Demanda Atendida (%)	Veículos 1º nível		Veículos 2º nível	
					Tipo Veículo	Qtd. Veículos (un)	Tipo Veículo	Qtd. Veículos (un)
12	3.840	2	3	34,6	1	2	2	4
13	4.800	2	4	43,1	1	2	2	4
14	5.760	2	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
15	5.760	3	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
16	5.760	4	6	53,1	1	3	2	6
							3	1
17	6.720	2	10	64,3	1	3	2	7
							3	2
18	6.720	3	10	64,3	1	3	2	7
							3	2
19	6.720	4	10	64,3	1	3	2	7
							3	2
20	7.680	2	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6
21	7.680	3	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6
22	7.680	4	17	73,7	1	3	2	8
							3	4
							4	6

Fonte: Elaborado pela autora.

Os satélites e clientes considerados para cada instância foram:

- Instâncias 1 e 12:
 - Satélites: Vila Velha e Serra;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória e Serra;

- Instância 2 e 13:
 - Satélites: Vila Velha e Serra;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra e Cariacica;

- Instância 3 e 14:
 - Satélites: Vila Velha e Serra;

- Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim e Linhares;

- Instância 4 e 15:
 - Satélites: Vila Velha, Serra e São Mateus;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim e Linhares;

- Instância 5 e 16:
 - Satélites: Vila Velha, Serra, São Mateus e Cachoeiro de Itapemirim;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim e Linhares;

- Instância 6 e 17:
 - Satélites: Vila Velha e Serra;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus e Aracruz;

- Instância 7 e 18:
 - Satélites: Vila Velha, Serra e São Mateus;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus e Aracruz;

- Instância 8 e 19:
 - Satélites: Vila Velha, Serra, São Mateus e Cachoeiro de Itapemirim;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus e Aracruz;

- Instância 9 e 20:
 - Satélites: Vila Velha e Serra;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus, Aracruz, Viana, Santa Maria de Jetibá, Castelo, Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de

São Francisco e Marataízes;

- Instância 10 e 21:
 - Satélites: Vila Velha, Serra e São Mateus;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus, Aracruz, Viana, Santa Maria de Jetibá, Castelo, Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de São Francisco e Marataízes;

- Instância 11 e 22:
 - Satélites: Vila Velha, Serra, São Mateus e Cachoeiro de Itapemirim;
 - Clientes: Vila Velha, Vitória, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina, São Mateus, Aracruz, Viana, Santa Maria de Jetibá, Castelo, Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de São Francisco e Marataízes.

As Instâncias 6 a 11 do Grupo 1 e 17 a 22 do Grupo 2 respeitam a Resolução nº 416/2009 do CONAMA, pois determinam a implantação de um ponto de coleta em todos os municípios do Espírito Santo com mais de 100 mil habitantes: Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina e São Mateus, de acordo com a estimativa da população dessas cidades para o ano de 2015, obtida por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2015). As seções a seguir mostram como os demais parâmetros foram definidos.

5.1 GERAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS

A geração diária de pneus inservíveis para cada cidade do Espírito Santo foi definida a partir da quantidade de veículos emplacados pelo Detran-ES para cada município do Espírito Santo, contido no Relatório Anual de Estatística de Trânsito – 2014 (DENATRAN, 2014). Foi considerado que a quantidade de pneus inservíveis gerados varia de acordo com a quantidade de pneus a serem trocados por ano, para cada tipo de veículo, sendo considerado 1 pneu trocado por ano para cada veículo

do tipo ciclomotor, motocicleta, motoneta, sidecar e triciclo; 2 pneus trocados por anos para cada veículo do tipo automóvel, quadriculo, reboque, utilitário e outros; 4 pneus trocados por anos para cada veículo do tipo caminhonete, caminhoneta, chassi plataforma, micro-ônibus, semirreboque e trator rodas; e 6 pneus trocados por anos para cada veículo do tipo caminhão, caminhão trator e ônibus. Assim, a quantidade de veículos emplacados foi multiplicada pela quantidade de pneus inservíveis trocados por ano para cada tipo de veículo. Esses valores somados e o total foi dividido por 360, a fim de que a quantidade diária de pneus inservíveis por município fosse calculada, Tabela 4.

Tabela 4 – Estimativa do número de pneus inservíveis gerados diariamente em cada município do ES

Município	Quantidade de pneus inservíveis/dia
Vitoria	1224
Vila Velha	1210
Serra	1144
Cariacica	883
Cachoeiro De Itapemirim	634
Linhares	396
Guarapari	352
Colatina	334
São Mateus	247
Aracruz	230
Viana	207
Santa Maria de Jetibá	170
Castelo	143
Nova Venécia	126
Domingos Martins	122
Barra de São Francisco	106
Marataízes	106

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 MATRIZ DE DISTÂNCIA

Para a resolução das instâncias, os dados referentes à matriz de distância entre as cidades foram levantados a partir de dados do Departamento de Estradas de Rodagem do Espírito Santo (DER-ES) (2015), Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz distância

	Ara-cruz	Barra de São Francisco	Cachoeiro de Itapemirim	Cariacica	Cas-telo	Cola-tina	Domin-gos Martins	Guara-pari	Linha-res	Mara-taízes	Nova Venécia	Santa Maria de Jetibá	São Mateus	Serra	Viana	Vila Velha	Vitória
Aracruz	0	220	218	88	230	79	131	129	60	194	208	85	142	57	108	86	82
Barra de São Francisco	220	0	411	282	424	142	325	323	188	388	77	233	146	250	302	280	276
Cachoeiro de Itapemirim	218	411	0	133	39	270	131	92	270	54	409	201	353	161	112	132	138
Cariacica	88	282	133	0	143	140	44	53	140	116	279	72	223	31	22	25	17
Castelo	230	424	39	143	0	283	106	130	282	92	421	211	365	173	132	156	148
Colatina	79	142	270	140	283	0	184	182	77	247	139	92	160	109	161	139	135
Domingos Martins	131	325	131	44	106	184	0	64	183	119	322	112	266	74	33	57	49
Guarapari	129	323	92	53	130	182	64	0	181	65	321	120	264	73	31	43	51
Linhares	60	188	270	140	282	77	183	181	0	246	149	137	83	109	160	138	134
Mara-taízes	194	388	54	116	92	247	119	65	246	0	385	184	329	137	95	108	116
Nova Venécia	208	77	409	279	421	139	322	321	149	385	0	231	69	248	299	277	273
Santa Maria De Jetibá	85	233	201	72	211	92	112	120	137	184	231	0	220	84	89	93	85
São Mateus	142	146	353	223	365	160	266	264	83	329	69	220	0	191	243	221	217
Serra	57	250	161	31	173	109	74	73	109	137	248	84	191	0	52	29	25
Viana	108	302	112	22	132	161	33	31	160	95	299	89	243	52	0	34	26
Vila Velha	86	280	132	25	156	139	57	43	138	108	277	93	221	29	34	0	8
Vitória	82	276	138	17	148	135	49	51	134	116	273	85	217	25	26	8	0

Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 VEÍCULOS UTILIZADOS E CUSTOS DE TRANSPORTE

Os veículos utilizados na frota do 1º nível possuem capacidade de 27,5 toneladas (tipo 1) e a frota do 2º nível é composta por 3 tipos diferentes de veículos com capacidades de 16,0 toneladas (tipo 2), 10,0 toneladas (tipo 3) e 3,5 toneladas (tipo 4). A empresa de reciclagem estima que a capacidade dos veículos em pneus seja de 3.000 pneus para o tipo 1, 1.600 pneus para o tipo 2, 500 pneus para o tipo 3 e 180 pneus para o tipo 4, considerando um pneu médio, Tabela 6.

Tabela 6 – Capacidades dos veículos

Veículo	Capacidade (ton)	Capacidade (pneus)
Tipo 1	27,5	3.000
Tipo 2	16,0	1.600
Tipo 3	10,0	500
Tipo 4	3,5	180

Fonte: Elaborado pela autora.

O custo variável de transporte de pneu por veículo foi calculado dividindo o custo variável de transporte por quilômetro rodado pela capacidade em pneus, para cada tipo de veículo, Tabela 7. O custo variável de transporte é a média dos custos com manutenção do veículo; custos com pneus, câmaras e recapagens; combustível; óleos; lavagens e graxas.

Tabela 7 – Custo variável de transporte

Veículo (tipo)	Custo do km rodado (R\$)	Capacidade (pneus)	Custo variável de transporte (R\$/km pneu)
1	1,53	3.000	0,00051
2	1,21	1.600	0,00076
3	1,10	500	0,0022
4	0,62	180	0,0034

Fonte: Elaborado pela autora.

O custo fixo de transporte é uma média que compreende depreciação, remuneração de capital, licenciamento, seguro obrigatório, IPVA, salário do motorista, encargos sociais e seguro do casco. Os dados de custos fixo e variável de transporte foram

obtidos do Portal Guia do TRC (2015a, b), Anuário NTC & Logística 2014/2015 (NTC, 2015) e Portal na Boleia (2015). Os valores para os custos fixos de transporte para os veículos do 1º nível e do 2º nível encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Custo fixo de transporte

Veículo (tipo)	Custo fixo mensal (R\$)	Custo fixo diário (R\$)
1	14.900,00	496,67
2	8.406,55	280,22
3	7.876,28	262,54
4	5.549,19	184,97

Fonte: Elaborado pela autora.

A restrição de acesso é encontrada em cidades com menos de 100 mil habitantes, onde não é permitida a circulação de veículos do tipo 2 no 2º nível: Aracruz, Viana, Santa Maria de Jetibá, Castelo, Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de São Francisco e Marataízes, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – População das cidades do Espírito Santo consideradas no estudo

Município	Habitantes (un)
Vitoria	355.875
Vila Velha	472.762
Serra	485.376
Cariacica	381.802
Cachoeiro De Itapemirim	208.702
Linhares	163.662
Guarapari	119.802
Colatina	122.646
São Mateus	124.575
Aracruz	95.056
Viana	74.499
Santa Maria de Jetibá	38.850
Castelo	37.829
Nova Venécia	50.294
Domingos Martins	34.416
Barra de São Francisco	44.599
Marataízes	37.923

Fonte: IBGE (2015).

5.4 CUSTO DE OPERAÇÃO

O custo de operação em cada satélite foi calculado com base no trabalho de Ferri, Chaves e Ribeiro (2015). Foi considerado um centro de armazém e triagem com capacidade de até 3.650 toneladas/ano, sendo R\$3.000,00/ano gastos com manutenção e pintura, R\$7.200,00/ano com energia, água, gás e telefone e a existência de 5 funcionários com um salário de R\$880,00/mês cada.

De acordo com o site Calculador (2015), um funcionário com salário de R\$880,00 por mês custa ao empregador R\$1.345,42 devido aos encargos, Tabela 10. Considerando cinco funcionários, chega-se a um total de R\$6.727,10 por mês ou R\$80.725,20 por ano.

Tabela 10 – Custo de um funcionário

Evento	Referência	Valor (R\$)
Salário	-	880,00
Vale transporte	-	0,00
Desconto vale transporte	-	0,00
Vale refeição	-	0,00
Plano de saúde	-	0,00
Outros benefícios	-	0,00
Provisão 13º salário	-	73,33
Provisão Férias	-	73,33
Provisão 1/3 Férias	-	24,44
FGTS	-	70,40
Provisão FGTS (13º e Férias)	-	13,69
INSS	20,00%	176,00
Provisão INSS (13º e Férias)	-	34,22
Custo Funcionário		R\$ 1.345,42

Fonte: Calculador (2015).

Dessa forma, o custo de operação anual é de R\$90.925,00, Tabela 11.

Tabela 11 – Custo anual de operação

Tipo	Custo (R\$/ano)
Salário de funcionários	80.725,20
Manutenção e pintura	3.000,00
Energia, água, gás e telefone	7.200,00
Total	90.925,20

Fonte: Elaborada pela autora.

Considerando a capacidade de 3650 toneladas do armazém, chega-se a um custo operacional de R\$24,91 por tonelada.

Considerando-se, ainda, que um veículo com capacidade de 27,5 toneladas pode comportar 3.000 pneus, por proporção tem-se que 1 tonelada é equivalente a 109,09 pneus. Assim, o custo operacional foi considerado como R\$0,23 por pneu.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O *solver* CPLEX 12.6 foi usado para resolver as 22 instâncias definidas no Capítulo 5. Os resultados das instâncias do Grupo 1 são mostrados na Tabela 12, onde a Coluna ‘Instância’ representa o número de instâncias. A Coluna ‘Satélites utilizados’ representa o número de satélites usados na solução. A coluna seguinte, ‘Número de veículos utilizados’, divide-se em duas colunas, ‘1º nível’ e ‘2º nível’, que se subdividem em duas outras colunas cada, ‘Tipo’ e ‘Qtd.’, que representam o tipo de veículo e a quantidade de veículos utilizados daquele tipo. Essas colunas informam a quantidade de veículos utilizados em cada nível, de acordo com o tipo de veículo. A Coluna ‘Função Objetivo’ representa o valor da solução em reais. A Coluna ‘Distância percorrida’ é dividida em duas colunas, a primeira, ‘1º nível’, representa o total de quilômetros percorridos por todos os veículos utilizados no 1º nível de cada instância. A segunda coluna, ‘2º nível’, representa o total de quilômetros percorridos no 2º nível por todos os veículos de um determinado tipo utilizados em cada instância. A coluna ‘Tempo de execução’ representa o tempo de execução do CPLEX para alcançar a melhor solução para cada caso. A última Coluna, ‘Gap’, representa o *gap* encontrado pelo CPLEX. Se o valor do *gap* for igual a zero, representa que o CPLEX atingiu a solução ótima, caso contrário, o CPLEX encontrou uma solução, porém, não pode ser garantido que ela seja a ótima.

Tabela 12 – Resultados das instâncias do Grupo 1

(continua)

Instância	Satélites utilizados	Número de veículos utilizados (un)				Função Objetivo (R\$)	Distância Percorrida (km)		Tempo de Execução (seg)	Gap (%)
		1º nível		2º nível			1º nível	2º nível		
		Tipo	Qtd.	Tipo	Qtd.					
1	2	1	2	2	3	3.578,30	552,0	20,0	0,39	0
2	2	1	2	2	4	4.461,34	552,0	82,0	0,39	0
3	2	1	2	2	4	5.491,68	494,0	561,0	0,95	0
4	2	1	2	2	4	5.491,68	494,0	561,0	1,6	0
5	2	1	2	2	4	5.491,68	494,0	561,0	2,19	0
6	2	1	3	2	5	6.655,38	712,0	1.122,0	4,32	0
				3	1					
7	3	1	3	2	6	6.655,39	993,0	949,0	4,66	0
				3	1					

Tabela 12 – Resultados das instâncias do Grupo 1

(continuação e conclusão)

Instância	Satélites utilizados	Número de veículos utilizados (un)				Função Objetivo (R\$)	Distância Percorrida (km)		Tempo de Execução (seg)	Gap (%)
		1º nível		2º nível			1º nível	2º nível		
		Tipo	Qtd.	Tipo	Qtd.					
8	4	1	3	2 3	5 1	6.656,15	982,0	1.351,0	7,69	0
9	2	1	3	2 3	6 4	7.637,93	828,0	2.167,0	7,81	0
10	3	1	3	2 3	5 3	7.637,65	935,0	2.095,0	11,12	0
11	4	1	3	2 3	5 4	7.637,35	982,0	2.183,0	18,4	0

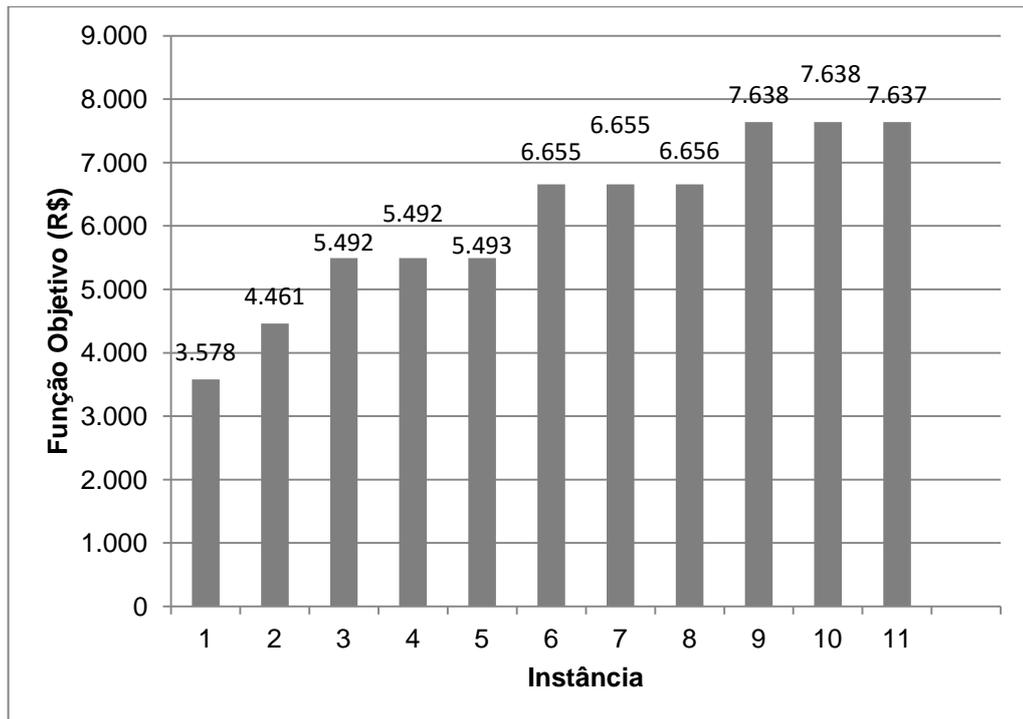
Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados da Tabela 12, a Instância 2 foi a única que usou toda a capacidade disponível para resolver o problema. As Instâncias de 1 a 3 e 6 a 11 utilizaram todos os satélites disponíveis para o roteamento.

As soluções das Instâncias 3, 4 e 5, todas com 6 clientes a serem atendidos, mostraram que a melhor opção era utilizar apenas 2 satélites, mesmo que 3 ou 4 satélites estivessem disponíveis. Uma possível razão para isso é o fato de que os 2 satélites escolhidos são localizados próximo aos clientes com maior demanda de pneus inservíveis.

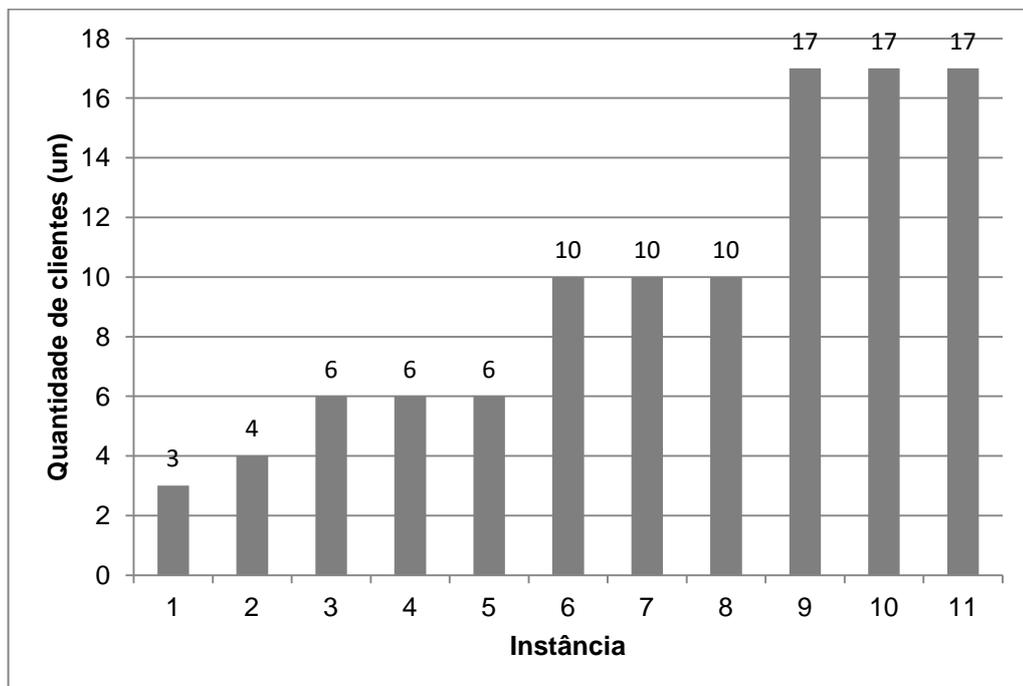
Como esperado, o valor da função objetivo cresce com o aumento de clientes atendidos, devido ao acréscimo dos custos de operação e do aumento das viagens realizadas. O mesmo ocorre com a distância percorrida pelos veículos no 2º nível, que aumenta com o aumento da quantidade de clientes a serem atendidos devido ao número maior de viagens realizadas, Figura 9, Figura 10 e Figura 11. No entanto, não é possível estabelecer uma relação entre a distância percorrida no 1º nível e o número de clientes.

Figura 9 – Valor da Função Objetivo para as instâncias do Grupo 1



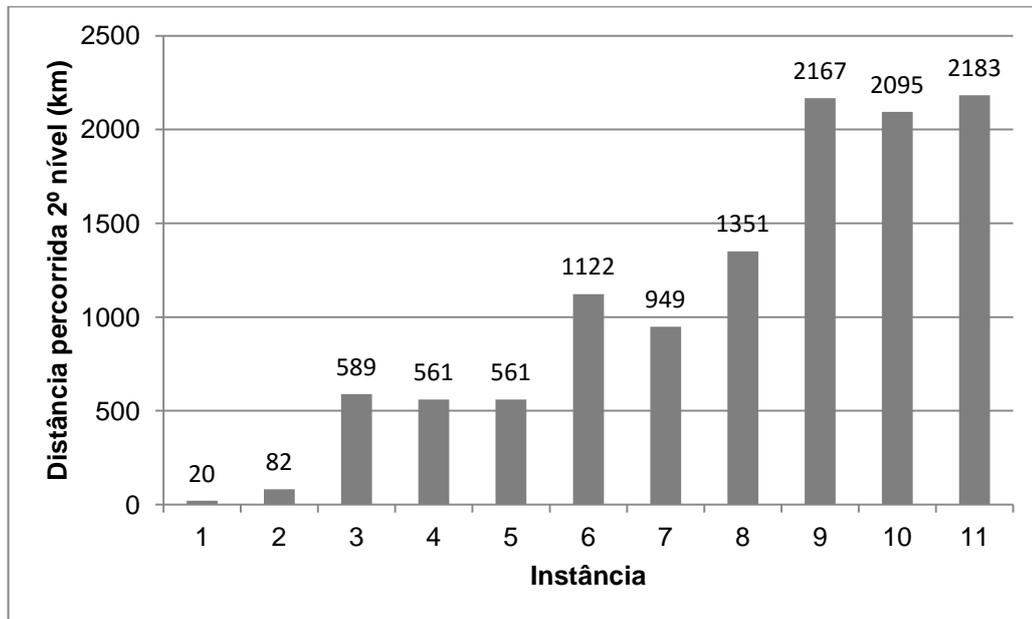
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 10 – Quantidade de clientes atendidos para as instâncias do Grupo 1



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11 – Distância percorrida no 2º nível para as instâncias do Grupo 1



Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores da função objetivo de Instâncias 6, 7 e 8 são muito próximos, embora sejam usados 2, 3 e 4 satélites, respectivamente, para servir os mesmos 10 clientes cada. Uma análise similar pode ser feita com as Instâncias 9, 10 e 11. Isso aconteceu porque o custo de operação é proporcional à quantidade de carga manuseada nos satélites, não levando em consideração os custos fixos de um satélite. Assim, esta parte da função objetivo não é afetada pelo número de satélites usados, uma vez que a carga transportada é a mesma. A diferença entre os valores da função objetivo é dada pela diferença na distância percorrida pelos veículos em cada caso.

Os resultados das instâncias do Grupo 2 são mostrados na Tabela 13, onde a Coluna 'Instância' representa o número de instâncias. A Coluna 'Satélites utilizados' representa o número de satélites usados na solução. A coluna seguinte, 'Número de veículos utilizados', divide-se em duas colunas, '1º nível' e '2º nível', que se subdividem em duas outras colunas cada, 'Tipo' e 'Qtd.', que representam o tipo de veículo e a quantidade de veículos utilizados daquele tipo. Essas colunas informam a quantidade de veículos utilizados em cada nível, de acordo com o tipo de veículo. A Coluna 'Função Objetivo' representa o valor da solução em reais e as siglas LB e

UB representam, respectivamente, os valores de *lower bound* e *upper bound* para as instâncias em que o CPLEX não encontrou uma solução ótima. A Coluna 'Distância percorrida' é dividida em duas colunas, a primeira, '1º nível', representa o total de quilômetros percorridos por todos os veículos utilizados no 1º nível de cada instância. A segunda coluna, '2º nível', representa o total de quilômetros percorridos no 2º nível por todos os veículos de um determinado tipo utilizados em cada instância. A coluna 'Tempo de execução' representa o tempo de execução do CPLEX para alcançar a melhor solução para cada caso. A última Coluna, 'Gap', representa o *gap* encontrado pelo CPLEX.

Tabela 13 – Resultados das instâncias do Grupo 2

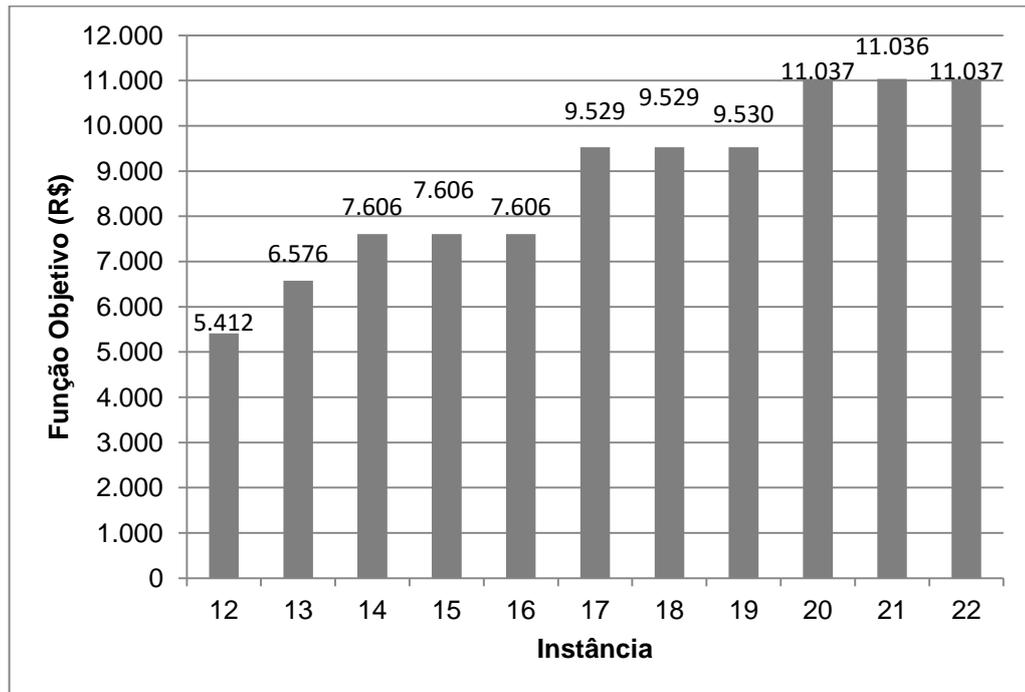
Instância	Sat. útil.	Número de veículos utilizados (un.)				Função Objetivo (R\$)	Distância Percorrida (km)		Tempo de Execução (seg)	Gap (%)
		1º nível		2º nível			1º nível	2º nível		
		Tipo	Qtd.	Tipo	Qtd.					
12	2	1	2	2	3	5.412,27	494,0	20,0	39,00	0,00
13	2	1	2	2	4	6.575,53	494,0	82,0	50,00	0,00
14	2	1	2	2	4	7.605,90	494,0	618,0	1,38	0,00
15	2	1	2	2	4	7.605,90	494,0	561,0	3,12	0,00
16	2	1	2	2	4	7.605,90	494,0	561,0	11,25	0,00
17	2	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{1}$	9.529,34	712,0	1.290,0	42,00	0,00
18	2	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{1}$	9.529,34	770,0	1250,0	192,32	0,00
19	3	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{1}$	LB = 9.213,2192 UB = 9.530,1833	1.034,0	1.446,0	7200,00	3,33
20	2	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$	11.036,58	712,0	2.275,0	4.726,23	0,00
21	3	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$	LB = 10.989,5379 UB = 11.036,3209	877,0	2.322,0	7200,00	0,42
22	3	1	3	$\frac{2}{3}$	$\frac{4}{3}$	LB = 10.044,7384 UB = 11.036,8562	660,0	2.282,0	7200,00	8,99

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos com a resolução das instâncias do Grupo 2 apresentaram um comportamento semelhante com os resultados obtidos das instâncias do Grupo 1

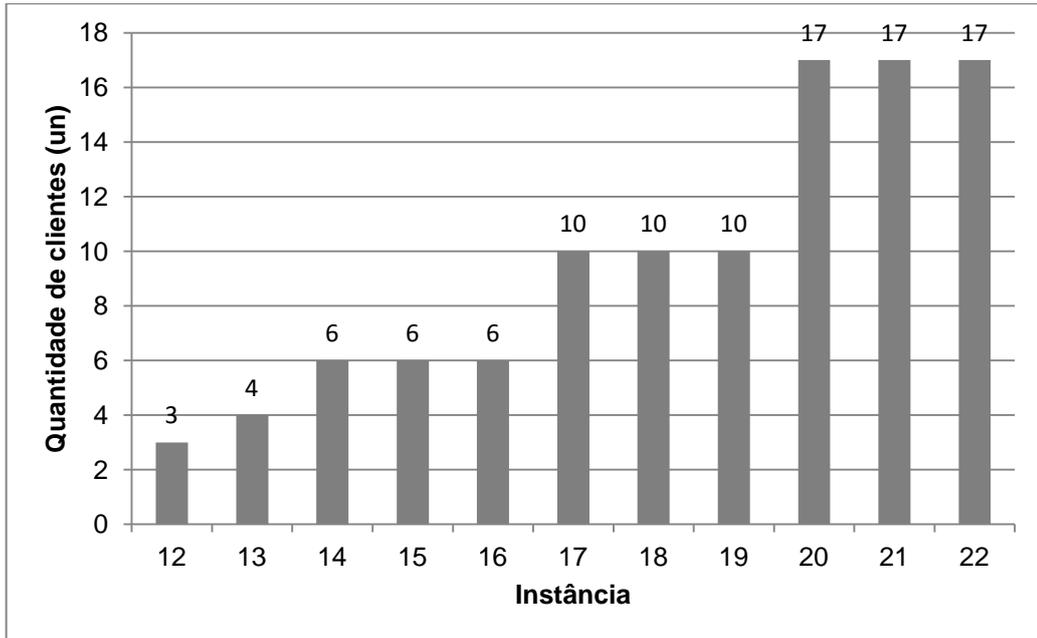
em relação ao crescimento do valor da Função Objetivo e da distância percorrida no 2º nível variando de acordo com o crescimento da quantidade de clientes atendidos, Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

Figura 12 – Função Custo da logística reversa para as instâncias do Grupo 2



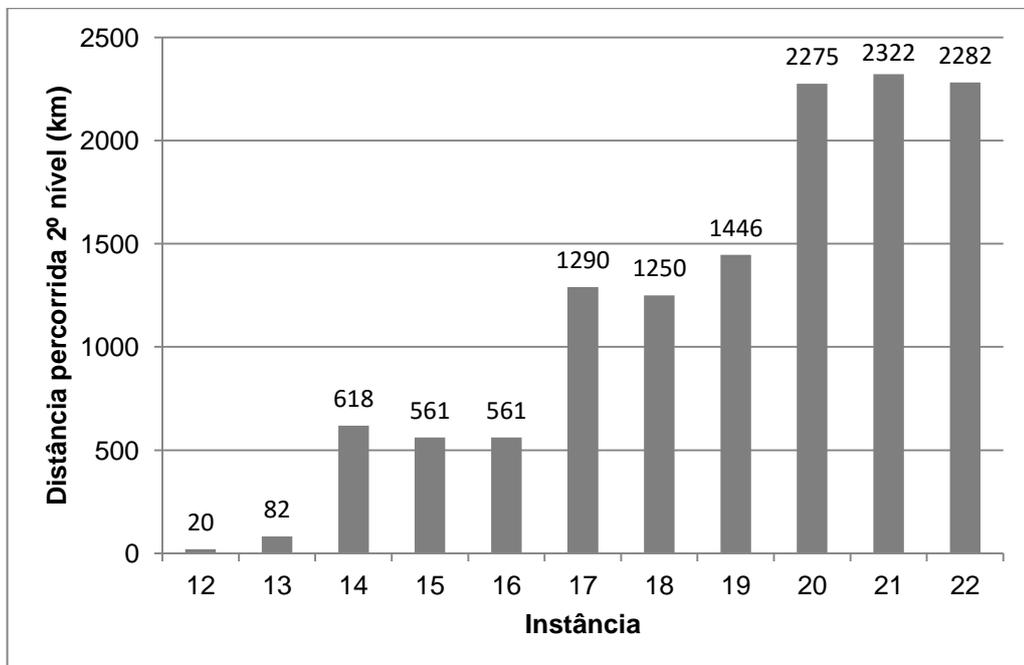
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Quantidade de clientes atendidos nas instâncias do Grupo 2



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Distância percorrida no 2º nível para as instâncias do Grupo 2



Fonte: Elaborado pela autora.

No entanto, as Instâncias 19, 21 e 22 apresentaram *gaps* de 3,33%, 0,42% e 8,99%

em um tempo de execução de 7.200 segundos. A Instância 20, embora tenha chegado a uma solução ótima, apresentou um tempo de processamento alto, de 4.726,23 segundos. A presença dos *gaps* e de um maior tempo de execução são explicados, dentro do Grupo 2, pelo aumento do número de satélites utilizados e clientes atendidos do problema. O aparecimento dos *gaps* e de um maior tempo de processamento é devido ao valor de custo fixo de transporte ser considerado no Grupo 2 diferente de zero, o que resulta em um aumento da complexidade do problema se comparado ao Grupo 1, em que as instâncias possuíam custo fixo de transporte igual a zero.

Em relação à utilização de veículos, a Tabela 14 e a Tabela 15 apresentam a porcentagem de veículos utilizados no 1º nível e no 2º nível, respectivamente. Essa porcentagem foi calculada dividindo-se a quantidade de veículos utilizados na resolução de cada instância pela quantidade de veículos disponíveis para cada instância, de acordo com o tipo de veículo. A coluna 'Instância' identifica a instância analisada; a coluna '1º nível' apresenta as porcentagens de veículos utilizados no 1º nível, veículos do 'Tipo 1', para cada instância; a coluna '2º nível' é dividida em 3 colunas e apresenta a porcentagem de veículos do 2º nível utilizados, de acordo com o tipo de veículo, podendo ser 'Tipo 2', 'Tipo 3' ou 'Tipo 4'.

Tabela 14 – Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias do Grupo 1

Instância	1º nível		2º nível	
	Tipo 1 (%)	Tipo 2 (%)	Tipo 3 (%)	Tipo 4 (%)
1	100,00	75,00	-	-
2	100,00	100,00	-	-
3	66,67	66,67	0,00	-
4	66,67	66,67	0,00	-
5	66,67	66,67	0,00	-
6	100,00	71,43	50,00	-
7	100,00	85,71	50,00	-
8	100,00	71,43	50,00	-
9	100,00	75,00	100,00	0,00
10	100,00	62,50	75,00	0,00
11	100,00	62,50	100,00	0,00
Média	90,91	66,67	91,67	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 15 – Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias do Grupo 1

Instância	1º nível		2º nível	
	Tipo 1 (%)	Tipo 2 (%)	Tipo 3 (%)	Tipo 4 (%)
12	100,00	75,00	-	-
13	100,00	100,00	-	-
14	66,67	66,67	0,00	-
15	66,67	66,67	0,00	-
16	66,67	66,67	0,00	-
17	100,00	57,14	50,00	-
18	100,00	57,14	50,00	-
19	100,00	57,14	50,00	-
20	100,00	50,00	75,00	0,00
21	100,00	50,00	75,00	0,00
22	100,00	50,00	75,00	0,00
Média	90,91	63,31	53,57	0,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 14 e na Tabela 15, o valor de 100% indica que todos os veículos daquele tipo, disponíveis para aquela instância, foram utilizados, enquanto o valor de 0,00% indica que nenhum veículo disponível foi utilizado. Os hifens existentes nas células dessas tabelas indicam que não havia aquele determinado tipo de veículo disponível para a instância em questão.

De acordo com a Tabela 14 e a Tabela 15, pode-se perceber que apenas as Instâncias 3, 4, 5, 14, 15 e 16 não utilizaram todos os veículos disponíveis no 1º nível, veículos do tipo 1. Dos 3 veículos disponíveis do tipo 1, essas instâncias utilizaram apenas 2 veículos. Apenas as Instâncias 2 e 13 utilizaram toda a frota disponível de veículos do tipo 2. Para os veículos do tipo 3, apenas as instâncias 9 e 11 utilizaram todos os veículos disponíveis. Em relação à frota definida para cada instância, nenhuma instância utilizou o veículo do tipo 4. Assim, percebe-se que para a maioria das instâncias, o tamanho da frota dos veículos do tipo 2, 3 e 4 foi superdimensionado.

Pode-se perceber também uma redução na média da porcentagem de veículos utilizados do tipo 2 e do tipo 3 das instâncias do Grupo 2 em relação às instâncias do grupo 1. A existência de custos fixos de transporte diferentes de zero no Grupo 2 explicam essa redução. Quando os custos fixos de transporte são iguais a zero,

como nas instâncias do Grupo 1, a função objetivo minimiza os custos relacionados à distância percorrida, tanto no 1º nível como no 2º nível e os custos relacionados à quantidade de pneus manuseados nos satélites. Quando os custos fixos de transporte são diferentes de zero, a função objetivo vai minimizar a quantidade de veículos utilizados no roteamento, além dos custos relacionados à distância percorrida e à carga manuseada. Porém, isso não é percebido quando se compara a média da porcentagem dos veículos utilizados no Grupo 1 e no Grupo 2. Isso porque a média dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 1 já era alta, 90,91%, de maneira que não foi possível diminuir a quantidade de veículos utilizados.

A Tabela 16 e a Tabela 17 também mostram impactos da existência do custo fixo de transporte, o impacto desses custos na porcentagem de ocupação dos veículos utilizados na resolução das instâncias do Grupo 1 e do Grupo 2, respectivamente. A coluna 'Instância' identifica a instância analisada; a coluna '1º nível' apresenta a porcentagem de ocupação dos veículos do 1º nível utilizados, 'Tipo 1'; a coluna 2º nível apresenta a porcentagem de ocupação dos veículos do 1º nível utilizados, de acordo com o tipo, podendo ser do 'Tipo 2', do 'Tipo 3' ou do 'Tipo 4'. O cálculo dessa porcentagem foi realizado dividindo a carga transportada em cada veículo utilizado em cada instância pela capacidade desse veículo. O valor de 100% indica que o veículo teve toda a sua capacidade utilizada, enquanto o valor de 0,00% indica que o veículo não foi utilizado. Os hifens existentes nas células das Tabelas 16 e 17 indicam que não havia aquele determinado tipo de veículo disponível para a instância em questão.

Tabela 16 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 1

(continua)

Instância	1º nível			2º nível				
	Qtd veículos usados tipo 1 (un)	Tipo 1 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 2 (%)	Qtd veículos usados tipo 3 (un)	Tipo 3 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 4 (%)
1	2	57,40	3	76,50	-	-	-	-
		61,87		75,63				
				71,50				

Tabela 16 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 1

(continuação)

Instância	1º nível		2º nível					
	Qtd veículos usados tipo 1 (un)	Tipo 1 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 2 (%)	Qtd veículos usados tipo 3 (un)	Tipo 3 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 4 (%)
2	2	100,00	4	76,50	-	-	-	-
		48,70		75,63				
3	2	83,03	4	94,81	0	0,00	-	-
		100,00		75,63				
4	2	92,13	4	94,81	0	0,00	-	-
		90,90		76,50				
5	2	83,03	4	94,81	0	0,00	-	-
		100,00		75,63				
6	3	21,80	5	76,50	1	46,00	-	-
		100,00		61,63				
7	3	100,00	6	96,50	1	46,00	-	-
		21,80		71,50				
8	3	89,23	5	95,38	1	46,00	-	-
		100,00		75,63				
		100,00		76,50				
		32,57		61,06				

Tabela 16 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 1

(continuação e conclusão)

Instância	1º nível			2º nível				
	Qtd veículos usados tipo 1 (un)	Tipo 1 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 2 (%)	Qtd veículos usados tipo 3 (un)	Tipo 3 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 4 (%)
9	3	54,47	6	61,63	4	74,20	0	0,00
		100,00		75,63		41,40		
		100,00		76,50		46,40		
				55,19		80,00		
				61,06		71,50		
10	3	94,40	5	97,63	3	99,80	0	0,00
		100,00		76,50		95,80		
		60,07		94,81		46,40		
				40,19				
				92,38				
11	3	100,00	5	76,50	4	65,80	0	0,00
		95,27		94,81		80,00		
		59,20		62,19		46,40		
				71,50		49,80		
				96,50				
Média (%)	80,21		77,27		61,71		0,00	

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 17 – Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 2

(continua)

Instância	1º nível			2º nível				
	Qtd veículos usados tipo 1 (un)	Tipo 1 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 2 (%)	Qtd veículos usados tipo 3 (un)	Tipo 3 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 4 (%)
12	2	100,00	3	76,50	-	-	-	-
		19,27		75,63				
				71,50				
13	2	100,00	4	76,50	-	-	-	-
		48,70		75,63				
				71,50				
				55,19				

Tabela 17– Porcentagem de ocupação dos veículos utilizados nas instâncias do Grupo 2

(continuação e conclusão)

Instância	1º nível				2º nível			
	Qtd veículos usados tipo 1 (un)	Tipo 1 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 2 (%)	Qtd veículos usados tipo 3 (un)	Tipo 3 (%)	Qtd veículos usados tipo 2 (un)	Tipo 4 (%)
14	2	100,00	4	75,63	0	0,00	-	-
		83,03		94,81				
				96,25				
15	2	92,13	4	75,63	0	0,00	-	-
		90,90		94,81				
				96,25				
16	2	90,90	4	94,81	0	0,00	-	-
		92,13		75,63				
				96,25				
17	3	52,07	4	97,63	1	95,40	-	-
		69,73		96,25				
		100,00		97,38				
18	3	21,80	4	97,63	1	95,40	-	-
		100,00		94,81				
		100,00		96,25				
19	3	100,00	4	97,63	1	95,40	-	-
		21,80		94,81				
		100,00		96,25				
20	3	100,00	4	97,63	3	99,80	0	0,00
		84,67		96,25		95,80		
		69,80		97,38		95,80		
21	3	85,77	4	97,63	3	99,80	0	0,00
		68,70		94,81		95,80		
		100,00		97,38		95,80		
22	3	87,17	4	97,63	3	99,80	0	0,00
		100,00		97,38		95,80		
		67,30		94,81		95,80		
				96,25				
Média (%)	80,21		89,50		89,26		0,00	

Fonte: Elaborado pela autora.

Uma análise comparativa da Tabela 16 com a Tabela 17 indica que a média da porcentagem de ocupação dos veículos de 2º nível utilizados na resolução das instâncias do Grupo 2 foi maior que a média de porcentagem das instâncias do Grupo 1. Para os veículos do 1º nível não houve alteração na média da porcentagem de ocupação, até porque não houve alteração da média da porcentagem de utilização dos veículos do tipo 1. Relacionando as Tabelas 14, 14, 16 e 17, conclui-se que quando se considera os custos fixos de transporte, a função objetivo minimiza a quantidade de veículos utilizados, entre outros quesitos, o que resultou numa maior ocupação dos veículos utilizados. Essa análise é importante porque mostra aos planejadores que, mesmo com uma frota própria, pode-se considerar mudar a função objetivo, buscando reduzir o número de veículos da frota.

Uma análise das rotas utilizadas em algumas instâncias é feita na Seção 6.1 a seguir. Na Seção 6.2 é apresentada uma análise geral dos resultados.

6.1 ANÁLISE DA REDE LOGÍSTICA REVERSA

Esta seção visa analisar a abrangência da rede logística reversa de pneus inservíveis no Espírito Santo a ser implantada. Para isso, foi plotado em mapas do Espírito Santo o roteamento resultante da resolução de algumas instâncias, sendo que as rotas de todas as instâncias encontram-se no APÊNDICE A. Foi considerado que a distância entre dois nós do problema seria igual à distância Euclidiana e foi considerado que a localização do cliente é diferente da localização do satélite nas cidades que são clientes e satélites ao mesmo tempo.

A Figura 15 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a resolução da Instância 12, Grupo 2. Essa instância representa a situação planejada para implantação da empresa recicladora, com uma capacidade de reciclagem de pneus que atenderia apenas 3 municípios geradores de pneus inservíveis, sendo que a prioridade é o atendimento dos clientes com maior geração de pneus inservíveis por dia. No 1º nível são realizadas duas rotas: uma rota entre a empresa recicladora, o

satélite situado em Vila Velha e o satélite situado na Serra; e uma rota entre a empresa recicladora e o satélite situado na Serra. No 2º nível, o satélite situado em Vila Velha coletou os pneus das cidades de Vitória e Vila Velha, através de duas rotas, uma para cada cidade cliente. O satélite situado na Serra coletou os pneus inservíveis da cidade da Serra. Nessa instância, a empresa recicladora é capaz de atender apenas a 34,6% do total dos pneus inservíveis gerados no estado, por dia.

A Figura 16 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a resolução da Instância 17, Grupo 2. Nessa instância, a empresa recicladora apresenta um incremento de 50% em sua capacidade de reciclagem e passa a atender 64,3% dos pneus inservíveis gerados por dia no estado. No 1º nível são realizadas três rotas: uma entre a empresa recicladora e o satélite situado em Vila Velha; e duas rotas, realizadas por dois veículos diferentes, entre a empresa recicladora e o satélite situada na Serra. No roteamento do 2º nível, o satélite situado em Vila Velha realiza uma rota que atende as cidades de Guarapari e Vila Velha. O satélite situado na Serra realiza quatro rotas: uma rota que atende as cidades Vitória e Colatina; uma rota que atende as cidades de Cachoeiro de Itapemirim e Cariacica; uma rota que atende as cidades Linhares e Serra; e uma rota que atende as cidades de Aracruz e São Mateus. É relevante observar que como não há satélite em Linhares, cidade onde está situado o depósito, os pneus inservíveis recolhidos na cidade de Linhares vão até o satélite situado na Serra antes de ir ao depósito. O mesmo ocorre em São Mateus, o que pode indicar a necessidade de um satélite no norte do Estado para o atendimento dessas cidades.

Por fim, a Figura 17 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a resolução da Instância 22, Grupo 2. Nessa instância, a empresa recicladora apresenta o dobro de sua capacidade de reciclagem inicial e passa a atender 73,7% dos pneus inservíveis gerados por dia no estado. No 1º nível, são realizadas três rotas: uma rota entre a empresa recicladora e os satélites situados na Serra e em Vila Velha; a segunda rota entre a empresa recicladora e o satélite da Serra; a terceira rota entre a empresa recicladora e o satélite situado em São Mateus. No roteamento do 2º nível, o satélite situado em Vila Velha realiza duas rotas: uma que atende as cidades de Vila Velha e Guarapari; e que atende as cidades de Santa Maria de Jetibá, Domingos Martins e Viana. O satélite da Serra realiza três rotas: uma que atende Vitória e Colatina; uma que atende Cachoeiro de Itapemirim e

Cariacica; e uma atende Marataízes, Castelo e Aracruz. O satélite de São Mateus realiza duas rotas: uma para atender as cidades Linhares e Serra; e uma para atender Barra de São Francisco e Nova Venécia.

Figura 15 – Roteamento da Instância 12



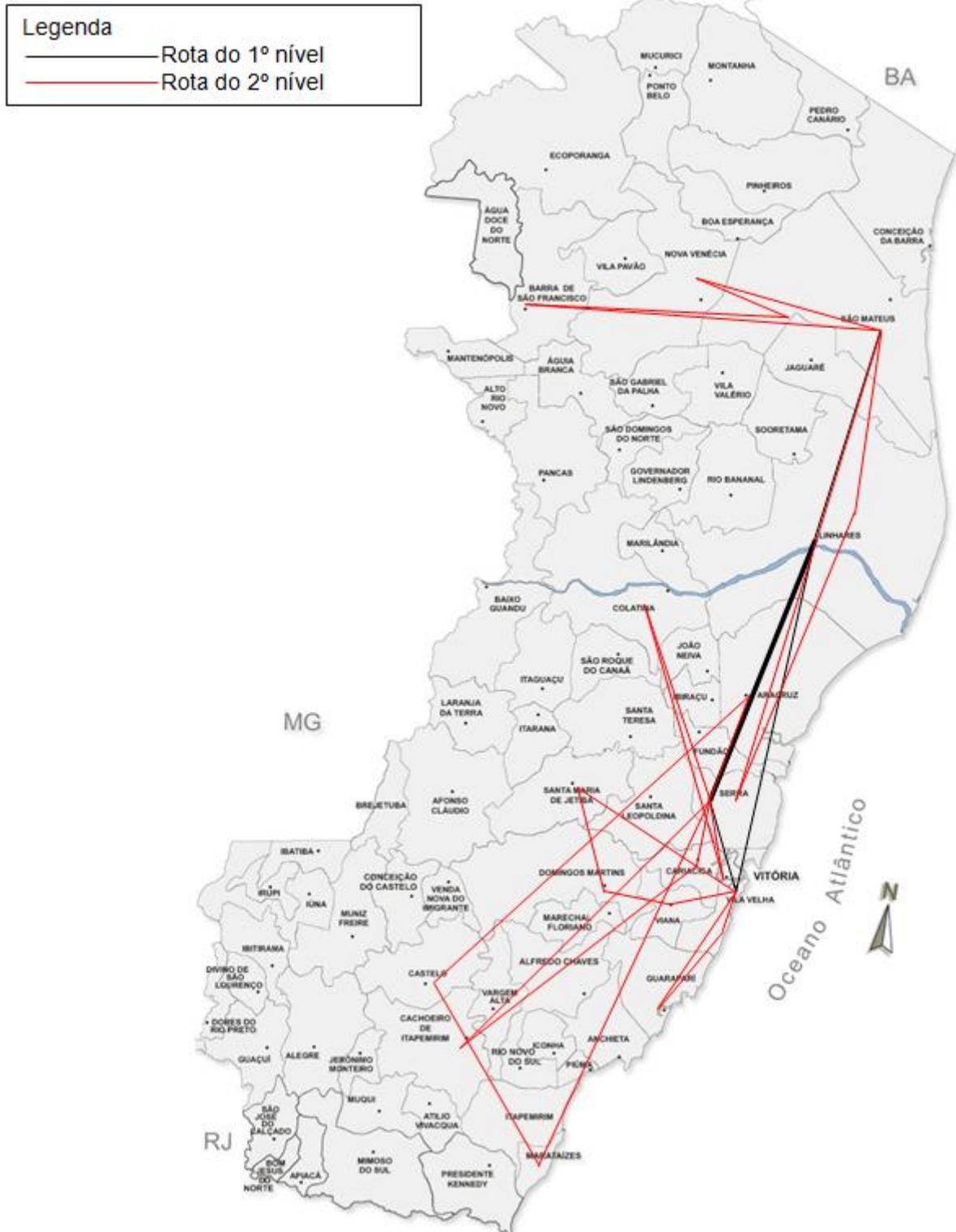
Fonte: Adaptado de Brasil Turismo (2016).

Figura 16 – Roteamento da Instância 17



Fonte: Adaptado de Brasil Turismo (2016).

Figura 17 – Roteamento da Instância 22



Fonte: Adaptado de Brasil Turismo (2016).

6.2 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

O modelo proposto resolveu as 22 instâncias definidas no Capítulo 5, sendo que 19 dessas instâncias apresentaram *gap* igual a zero, ou seja, a solução ótima, e 3 dessas instâncias apresentaram *gap* de no máximo 8,99% após 7.200 segundos de processamento do CPLEX. Essas instâncias continham algumas das maiores quantidades de satélites utilizados e clientes atendidos, além de serem instâncias do Grupo 2 e, portanto, considerarem custos fixos de transporte diferente de zero, o que aumentou a complexidade da resolução.

Pode-se perceber ainda, que a consideração dos custos fixos de transporte na função objetivo pode resultar na minimização do tamanho da frota a ser utilizada e em sua maior ocupação. A resolução das instâncias, principalmente as instâncias do Grupo 2, permite concluir que a frota definida para o 1º nível do problema, veículos do tipo 1, é, em média, ideal para as instâncias propostas, mas as frotas definidas para os veículos do tipo 2, tipo 3 e tipo 4 foram superdimensionadas. Essas informações possibilitam aos gestores um redimensionamento das frotas a fim de obter diminuição dos custos de obtenção dos veículos.

É importante analisar a utilização dos veículos do tipo 4, que não foram utilizados em nenhuma instância do Grupo 2. Uma possível razão para a não utilização de nenhum veículo desse tipo pode ser a sua pequena capacidade em relação à quantidade de pneus inservíveis gerados na maioria dos clientes. Além disso, a existência de restrições de acesso a mais cidades do que as consideradas nas instâncias, ou ainda, restrições de acesso a veículos do tipo 3, que não foi considerado nas instâncias definidas, poderia levar à utilização de veículos do tipo 4 em alguma instância.

Em relação à distância percorrida para o atendimento dos clientes, é notório que o total de quilômetros percorridos no 2º nível de cada instância aumenta com a adição de clientes no problema. Esta situação ocorre porque os veículos devem visitar mais clientes e, por isso, maior deve ser a distância a ser percorrida. A função objetivo também aumenta com o aumento da demanda, isso acontece porque a carga total movimentada nos satélites aumenta, aumentando os custos de operação, e a rota no 2º nível tende a ser maior, aumentando os custos totais de viagem.

Analisando a situação real de implantação da empresa de reciclagem de pneus, chega-se à conclusão de que a capacidade projetada para a sua implantação atende apenas a 34,6% da geração de pneus estimada para o Espírito Santo, sendo necessária a duplicação dessa capacidade inicial para atender a 73,7% da geração de pneus estimada. Dessa forma, percebe-se que o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis no Espírito Santo depende da existência de outras empresas recicladoras no estado a fim de atender à toda a geração de pneus inservíveis, ou ainda, considerar a possibilidade de recolher os pneus para serem reciclados em empresas de outros estados. No entanto, um levantamento de dados mais preciso em relação à efetiva geração de pneus no Espírito Santo pode apresentar uma variação nesses percentuais, visto que o levantamento desses dados é, ainda, de extrema dificuldade.

Além disso, em relação à legislação vigente, as Instâncias propostas 6 a 11 e 17 a 22 atendem à Resolução nº 416/2009 do CONAMA que determina que todo município com mais de 100 mil habitantes deve possuir um ponto de coleta de pneus inservíveis.

Assim, pode-se dizer que o modelo proposto é capaz de realizar o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis no Espírito Santo, Brasil. O modelo foi capaz de minimizar os custos fixos e variáveis de transporte e os custos de manipulação. Finalmente, o estudo trouxe uma nova variante do 2E-CVRP que considerou frota e restrições de acesso heterogêneas em determinados clientes que podem ser servidos apenas por certos tipos de veículos do 2º nível. O modelo foi nomeado como *Two-Echelon Capacitado Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence* (2E-VRP-HFSD). O modelo proposto pode ser usado para planejar sistemas similares de logística reversa de produtos pós-consumo organizada em dois níveis.

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação propôs o modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet and Site Dependence* para a logística reversa de produtos pós-consumo estruturada em dois níveis. O desenvolvimento do modelo teve como base o modelo matemático 2E-CVRP proposto por Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013) e diferencia-se dele por considerar a possibilidade de existência de frota heterogênea no 2º nível do problema e restrições de acesso de alguns veículos a determinadas vias, de acordo com o porte do veículo. Além disso, sua função objetivo, que deve ser minimizada, considera os custos fixos de transporte envolvidos no problema e não apenas os custos variáveis de transporte, os custos das viagens realizadas no 1º e no 2º níveis e o custo de operação das cargas nos satélites, como no modelo de Jepsen, Ropke e Spoorendonk (2013). Essa alteração na função objetivo resultou na utilização de uma quantidade média menor de veículos do 2º nível e uma maior ocupação dos veículos utilizados, em média, para o atendimento de todos os clientes. Essa análise é importante porque mostra aos planejadores que, mesmo com uma frota própria, pode-se considerar mudar a função objetivo, buscando reduzir o número de veículos da frota.

O modelo é capaz de realizar o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis integrada em dois níveis, identificando a rota ótima, a frota necessária e os satélites mais interessantes a serem utilizados para a resolução do problema. Dessa forma, o modelo contribui à literatura por apresentar uma nova variação ao modelo 2E-CVRP e por tratar da resolução da logística reversa. Neste caso, por se tratar da logística reversa de pneus inservíveis, o ganho deixa de ser apenas em relação à modelagem matemática e à preservação do meio ambiente e toma uma proporção maior, abrangendo questões de saúde pública, devido à epidemia de doenças relacionada à proliferação de mosquitos, que muitas vezes utilizam pneus inservíveis abandonados no meio ambiente para depositar seus ovos.

Em relação à logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, o modelo resolveu, com o *solver* CPLEX 12.6, 19 das 22 instâncias definidas e apresentou *gap* máximo de 8,99% nas outras 3 instâncias. Foram resolvidas instâncias que projetavam incrementos na capacidade da empresa recicladora de pneus a ser implantada, de maneira que uma maior quantidade de pneus inservíveis

gerados fosse reciclada. No entanto, não era objetivo do trabalho identificar a melhor instância para a empresa recicladora. O objetivo era realizar um roteamento de acordo com a situação real do sistema, Instância 1, e a projeção de situações futuras, considerando incrementos na capacidade de reciclagem e no tamanho das frotas utilizadas.

Pode-se observar, a partir da resolução do problema de logística reversa de pneus inservíveis no Espírito Santo, alguns comportamentos do modelo. O valor da função objetivo sofre incrementos com o aumento do número de clientes a serem atendidos. O mesmo ocorre para a distância percorrida pelos veículos do 2º nível, que sofre acréscimos com o aumento de clientes atendidos. Um fato importante observado é que, embora a utilização de veículos de menor porte propicie uma melhor logística urbana, deve-se levar em consideração o tamanho da demanda a ser atendida, para analisar a capacidade do veículo. No caso dos pneus inservíveis, o veículo do tipo 4 possuía uma capacidade muito inferior à quantidade gerada de pneus por dia pela maioria dos clientes definidos e, acredita-se que por isso, ele não tenha sido escolhido para a resolução de nenhuma instância.

Os resultados apresentados possibilitam aos gestores da empresa recicladora de pneus analisarem a possibilidade de expansão da empresa devido ao elevado número de pneus inservíveis gerados no estado do Espírito Santo. Além disso, a metodologia apresentada nesta dissertação pode colaborar na elaboração de procedimentos para a coleta de pneus inservíveis por parte de fabricantes e importadores de pneus, pois possui instâncias que atendem a legislação vigente de descarte de pneumáticos, sendo possível dimensionar ou redimensionar as frotas a serem utilizadas, de maneira que o custo total de transporte seja minimizado.

7.1 SUGESTÕES A TRABALHOS FUTUROS

A metodologia apresentada nesta dissertação pode servir para sistemas de logística reversa similares ao de pneus inservíveis, servindo como uma ferramenta estratégica, tática e operacional para o funcionamento do sistema. No entanto, por se tratar de um problema combinatório *NP-Hard*, o CPLEX é capaz de resolver apenas instâncias de médio porte. Para sistemas logísticos de maior porte, sugere-

se a utilização de *meta-heurísticas* para o modelo proposto.

Em relação ao planejamento da logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, uma limitação deste trabalho foi a dificuldade na obtenção de dados relativos à geração de pneus inservíveis. Portanto, uma sugestão a trabalhos futuros é a proposição do levantamento da efetiva geração de pneus inservíveis no estado.

REFERÊNCIAS

- ANIP, Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. **História do pneu**. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=anip>>. Acesso em: 20 dez. 2015.
- BALDACCI, R.; MINGOZZI, A.; ROBERTI, R. An Exact Algorithm for the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problems. **Operations Research**, 61, p. 298-314, 2013.
- BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 15 out. 2015.
- Brasil Turismo. Disponível em <<http://www.brasil-turismo.com/espírito-santo/mapas/mapa-politico.htm>>. Acesso em 20 jan. 2016.
- Calculador. **Cálculo de custo de funcionário para empresa**. Disponível em: <<http://www.calculador.com.br/calculo/custo-funcionario-empresa>>. Acesso em: 10 jan. 2016.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999. **Diário Oficial da União**, 2 dez. 1999.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 301, de 21 de março de 2002. **Diário Oficial da União**, 28 ago. 2003.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Nº416, de 30 de setembro de 2009. **Diário Oficial da União**, 1 dez. 2009.
- CRAINIC, T.G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G.; TADEI, R. GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem. **CIRRELT**, 45, 2012.
- CRAINIC, T. G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G.; TADEI, R. Clustering-Based Heuristic for the Two-echelon Vehicle Routing Problem. **CIRRELT**, 46, 2008.
- CRAINIC, T.G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G.; TADEI, R. Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. **CIRRELT**, 30, 2010.
- CRAINIC, T. G.; RICCIARDI, N.; STORCHI, G. Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. **CIRRELT**, 11, 2009.
- CUDA, R.; GUASTARROBA, G.; SPERANZA, M. G. A survey on two-echelon routing problems. **Computers & Operations research**, 55, p. 185-199, 2015.
- DENATRAN, Departamento Nacional de Trânsito. **Relatório anual de estatística de trânsito (2014)**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>>. Acesso em 10 dez. 2015.
- DER-ES. Departamento de Estradas de Rodagem do Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.der.es.gov.br/download/TabelaDistancias.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

FELIU, J. G.; PERBOLI, G.; TADEI, R.; VIGO, D. The Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. Technical Report. **Control and Computer Department Politecnico de Torino**, University of Bologna, Bologna, Italy, 2007.

FERRI, G. L.; CHAVES, G. L. D.; RIBEIRO, G. M. Analysis and location of urban solid waste collection/inspection centers for a reverse logistics network: a case study in São Mateus-ES. **Production**, 25(1), p. 27-42, 2015.

FRAGMAQ. **Descarte de pneus**. 2012. Disponível em: <http://www.fragmaq.com.br/blog/reciclagem-residuos-solidos/descarte-de-pneus/>. Acesso em: 15 mai. 2014.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GRANGIER, P.; GENDREAU, M.; LEHUÉDÉ, F.; ROUSSEAU, L. M. An Adaptive Large Neighborhood Search for the Two-Echelon Multiple-Trip Vehicle Routing Problem with Satellite Synchronization. **CIRRELT**, 33, 2014.

HEMMELMAYR, V. C.; CORDEAU, J. F.; CRAINIC, T. G. An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. **Computers & Operations Research**, 39, p. 3215–28, 2012.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=320490>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

JABALI, O., VAN WOENSEL, T., KOK, A.G. Analysis of Travel Times and CO2 Emissions in Time-Dependent Vehicle Routing. **Production and Operations Management**, 21, p. 1060-1074, 2012.

JEPSEN, M.; ROPKE, S.; SPOORENDONK, S. A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. **Transportation Science**, 47, p. 23–37, 2013.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENORIO, J. A. S. Reverse logistics for post-consumer tires in Brazil. **Polímeros**, 23, n. 1, p. 49-58, 2013 .

LEITE, Paulo Roberto. Canais de distribuição reversos: Logística Reversa e a Responsabilidade Empresarial. **Revista Tecnológica**, 2002.

LEITE, Paulo Roberto. **Logística reversa: meio ambiente e competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEITE, Paulo Roberto. Logística Reversa: nova área da Logística Empresarial. **Revista Tecnológica**, 2002.

MANCINI, Simona. Multi-Echelon Distribution Systems in City Logistics. **European Transport**, 54, n. 2, 2013.

MAPA, Silvia Maria Santana. **Localização-alocação de instalações com Sistema de Informações Geográficas e modelagem matemática**. 2007. f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá.

MEIHUA, W.; XUHONG, T.; SHAN, C.; SHUMIN, W. Hybrid ant colony optimization algorithm for two echelon vehicle routing problem. **Procedia Engineering**, 15, p. 3361 – 3365, 2011.

MONTOYA-TORRES, J. R.; FRANCO, J. L.; ISAZA, S. N.; JIMÉNEZ, H. F.; HERAZO-PADILLA, N. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. **Computers & Industrial Engineering**, 79, p. 115–129, 2015.

NTC, Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. **Anuário NTC & Logística**. Disponível em: <<http://www.portalntc.org.br/media/images/publicacoes/anuario-2014-2015/files/assets/common/downloads/page0062.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

Portal Guia do TRC. **Planilha de custos operacionais de caminhões semi-pesados**. Disponível em: <www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes_semip.xls>. Acesso em: 15 jan. 2016a.

Portal Guia do TRC. **Planilha de custos operacionais de caminhões pesados**. Disponível em: <www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes_pesados.xls>. Acesso em: 15 jan. 2016b.

Portal Na Boleia. **Escassez de motoristas pode elevar custos do TRC**. Disponível em: <<http://naboleia.com.br/escassez-de-motoristas-pode-elevar-custos-do-trc/>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

PERBOLI, G.; TADEI, R.; VIGO, D. The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problems. **CIRRELT**, 55, 2008.

PERBOLI, G.; TADEI, R.; VIGO, D. The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problems. **Transportation Science**, 45, n. 3, p. 364-380, 2011.

PIRES, S. R. I. **Gestão da cadeia de suprimentos: conceitos, estratégias, práticas e casos**. 2ª ed., São Paulo, Editora Atlas, 2009.

Portal Brasil. **Governo alerta para risco de proliferação do Aedes durante férias e festas de fim de ano**. Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/saude/2015/12/governo-alerta-para-risco-de-proliferao-do-aedes-durante-ferias-e-festas-de-fim-de-ano>>. Acesso em 10 jan. 2016.

QUAK, Henricus Joannes. **Sustainability of Urban Freight Transport Retail Distribution and Local Regulations in Cities**. 2008. 262f. Tese (doutorado em Gestão) – Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus University Rotterdam, Rotterdam.

RECICLANIP. **Principais destinações dos pneus inservível**. Disponível em:< <http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-principais-destinacoes>> Acesso em: 05 abr. 2015.

SANTOS, F. A.; DA CUNHA, A. S.; MATEUS, G. R. Branch-and-price algorithms for the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. **Optimization Letters**, 7, p. 1537–1547, 2013.

SCHMID, V.; DOERNER, K. F.; LAPORTE, G. Rich routing problems arising in supply chain management. **European Journal of Operational Research**, 224, p.

435–448, 2013.

SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3 ed. rev. atualiz. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SITEK, P.; WIKAREK J. A novel integrated approach to the modelling and solving of the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem. **Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal**, 2:1, p. 326-340, 2014.

SOYSAL, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; BEKTAS, T. The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. **International Journal of Production Economics**, 2014.

VELOSO, Z. M. F. **Ciclo de Vida dos Pneus**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Zilda-Maria-Faria-Veloso-Ciclo-Vida-Pneus.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2016.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 13. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

ZHENG-YANG, Z.; WEI-SHENG, X.; ZHI-YU, X.; WEI-HUI, S. A Hybrid GRASP+VND Heuristic for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem Arising in City Logistics. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014, p. 11, 2014.

APÊNDICE A – Rotas encontradas em cada instância

- Instâncias 1:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 2:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 3:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 4:

- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Instância 5:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Instância 6:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Vellha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Vellha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)

- Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 7:

- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 3 (São Mateus) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Vellha)
- Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Vellha)
- Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 7 (Guarapari) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Vellha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 3 (São Mateus)

- Instância 8:

- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 3 (São Mateus) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Vellha)
- Satélite 1 (Vila Vellha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Vellha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 8 (Colatina) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 3 (São Mateus)

- Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim)

- Instância 9:

- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 11 (Viana) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 13 (Castelo) > Cliente 17 (Marataízes) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 8 (Colatina) > Cliente 9 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 10:

- Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 2 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 3 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)

- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Cliente 11 (Viana) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Cliente 17 (Marataízes) > Cliente 13 (Castelo) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Satélite 3 (São Mateus)
- Instância 11:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 3 (São Mateus) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Cliente 11 (Viana) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 8 (Colatina) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 3 (São Mateus)
 - Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Satélite 3 (São Mateus)
 - Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 13 (Castelo) > Cliente 17 (Marataízes) > Satélite 4

- Instâncias 12:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 13:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 14:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 15:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)

- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
- Instância 16:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
- Instância 17:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 7 (Guarapari) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Cliente 9 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 18:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 10 (Aracruz) > Cliente 9 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 19:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Cariacica) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 7 (Guarapari) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 10 (Aracruz) > Cliente 9 (São Mateus) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim)

- Instância 20:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) >

Depósito (Linhares)

- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 7 (Guarapari) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 11 (Viana) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 17 (Marataízes) > Cliente 13 (Castelo) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 3 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Satélite 2 (Serra)

- Instância 21:

- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
- Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 3 (São Mateus) > Depósito (Linhares)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Cliente 11 (Viana) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 8 (Colatina) > Cliente 1 (Vila Velha) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 13 (Castelo) > Cliente 17 (Marataízes) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)

- Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Satélite 3 (São Mateus)

- Instância 22:
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Satélite 1 (Vila Velha) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Linhares)
 - Depósito (Linhares) > Satélite 3 (São Mateus) > Depósito (Linhares)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Guarapari) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 12 (Santa Maria de Jetibá) > Cliente 15 (Domingos Martins) > Cliente 11 (Viana) > Satélite 1 (Vila Velha)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 1 (Vila Velha) > Cliente 8 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Cariacica) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 2 (Serra) > Cliente 17 (Marataízes) > Cliente 13 (Castelo) > Cliente 10 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)
 - Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 6 (Linhares) > Cliente 3 (Serra) > Satélite 3 (São Mateus)
 - Satélite 3 (São Mateus) > Cliente 16 (Barra de São Francisco) > Cliente 9 (São Mateus) > Cliente 14 (Nova Venécia) > Satélite 3 (São Mateus)