

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

LIRIELLY RUELA VITORUGO  
RAIANE LECCHI CALIMAN

**PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS  
INSERVÍVEIS PARA ATENDER UMA PLANTA GERADORA  
DE ENERGIA COM BASE NO MODELO *TWO-ECHELON*  
*CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME*  
*WINDOWS***

VITÓRIA  
2017

LIRIELLY RUELA VITORUGO

RAIANE LECCHI CALIMAN

**PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS  
INSERVÍVEIS PARA ATENDER UMA PLANTA GERADORA  
DE ENERGIA COM BASE NO MODELO *TWO-ECHELON*  
*CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME*  
*WINDOWS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

VITÓRIA

2017

LIRIELLY RUELA VITORUGO  
RAIANE LECCHI CALIMAN

**PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS PARA  
ATENDER UMA PLANTA GERADORA DE ENERGIA COM BASE NO MODELO  
*TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME  
WINDOWS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Departamento de Engenharia de Produção do  
Centro Tecnológico da Universidade Federal do  
Espírito Santo.

Aprovada em 27 de julho de 2017.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. M.<sup>a</sup> Karina Pedrini Fraga  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Gustavo de Luna Pinto  
Universidade Federal do Espírito Santo

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele eu nada seria. “*Até aqui nos ajudou o Senhor*” – I Samuel 7:12. Aos meus pais por todo o amor, esforço, dedicação e por sempre apoiarem as minhas escolhas. Ao meu namorado, Rafael Nascimento, por não medir esforços em me apoiar, me ajudar e me amar em todos os momentos. Ao meu orientador Rodrigo Rosa por todo o conhecimento transferido. Aos meus amigos da graduação, principalmente Alana, Bruna, Henrique, Letícia, Ludimila e Raiane, por meio do companheirismo conseguimos superar os momentos difíceis juntos. A todos meu familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu alcançasse esta etapa da minha vida.

*Lirielly Ruela Vitorugo*

Agradeço primeiramente ao Deus Onipresente, pois *“sei que Seus olhos sempre atentos permanecem em mim”*. À minha família pelo apoio incondicional, amor e todo o suporte oferecido diante de minhas noites mal dormidas, isolamento nos finais de semana e privações durante a graduação. Ao meu Orientador Rodrigo de Alvarenga Rosa pela orientação, pela mediação do conhecimento e pela disponibilidade de atendimento. A todos os meus amigos e familiares, que apesar da minha ausência, por meus intermináveis momentos de estudo, se fizeram sempre presentes e coloriram a estrada até aqui. Sou grata à Célula ON2 pelas orações, conselhos e troca de experiências. Agradeço, também, à Lirielly Vitorugo, pela colaboração e parceria no decorrer do curso, e às “Muxibas” Leticia Peruchi e Ludimila Uchôa pela amizade incondicional. Do curso para a vida. Já efetivamos o primeiro passo. De maneira geral, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

*Raiane Lecchi Caliman*

*“If you can't explain it simply, you don't understand it well enough”.*

Albert Einstein

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota. ”

Madre Teresa de Calcutá

## RESUMO

Um dos principais resíduos que um veículo automotivo produz durante a sua vida útil é o pneu. Estima-se que são descartados anualmente 800 milhões de pneus no mundo. O acúmulo desses resíduos dispostos inadequadamente é um grave problema uma vez que eles possuem tempo de decomposição ainda desconhecido, causam diversos impactos ambientais e geram problemas de saúde. Devido a legislação ambiental vir responsabilizando cada vez mais os produtores pela destinação final de produtos pós-consumo, o planejamento da logística reversa vem ganhando cada vez mais importância no meio empresarial e acadêmico. O *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)* é um problema de roteamento de veículos em dois níveis. No primeiro nível, os fretes são realizados por veículos de grande porte e partem de um depósito central com destino às instalações satélites, que são centros de distribuição e consolidação de cargas. No segundo nível, dos satélites os fretes são conduzidos aos clientes finais por meio de veículos de menor porte. O 2E-CVRP possui diversas aplicações práticas, sendo uma delas a logística reversa por meio do uso de centros de consolidação de cargas. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma variação do 2E-CVRP, com a proposição do modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows (2E-CVRP-HFSDTW)*, para o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis estruturada em centros de consolidação de pneus (CCP). Como diferencial, este modelo considera a existência de frota heterogênea nos dois níveis, janela de tempo no 2º nível e restrição na duração total de cada rota nos dois níveis do 2E-CVRP. Além disso, sua função objetivo considera os custos fixos e variáveis de transporte envolvidos no problema, os custos das viagens realizadas e o custo de operação das cargas nos satélites. O modelo proposto foi testado no caso real de logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo a partir da definição de 14 instâncias e, com o uso do *solver* CPLEX 12.6, resolveu 12 instâncias apresentando GAP de no mínimo 7,66%. Os resultados confirmam a complexidade do problema NP-Hard e que o número de variáveis influencia diretamente no tempo de execução do modelo, tendo em vista que o 2E-CVRP-HFSDTW é uma das variações mais completas do CVRP. Essa pesquisa contribuiu para a literatura por apresentar uma nova variação ao modelo 2E-CVRP e por tratar

da avaliação de demanda para a movimentação de cargas dentro de áreas urbanas, considerando o fluxo reverso da cadeia.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Consolidação de pneus em um CCP.</i> .....	15
<i>Figura 2 - Taxonomia do 2E-CVRP segundo Perboli, Tadei e Vigo (2011)</i> .....	20
<i>Figura 3 - Critérios de delineamento da pesquisa</i> .....	29
<i>Figura 4 - Etapas da Pesquisa</i> .....	31
<i>Figura 5 - Representação da rede de logística reversa do pneu</i> .....	34
<i>Figura 6 - Distribuição 2E-CVRP-HFSDTW</i> .....	35
<i>Figura 7 - Distância percorrida no 2º nível para as instâncias</i> .....	58
<i>Figura 8 - Quantidade de clientes atendidos nas instâncias</i> .....	58
<i>Figura 9 - Função custo da logística reversa de pneus inservíveis para as instâncias</i> .....	61
<i>Figura 10 - Roteamento da instância 1</i> .....	64
<i>Figura 11 - Roteamento da Instância 3</i> .....	65
<i>Figura 12 - Roteamento da Instância 6</i> .....	66

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Resumo da Revisão de Literatura .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 2 - Definição das instâncias do problema .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 3 – Estimativa do número de pneus inservíveis gerados diariamente em cada município do ES .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 4 - Capacidades dos veículos .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 5 - Custo variável de transporte.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 6 - Custo fixo de transporte .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 7 - População das cidades do Espírito Santo consideradas no estudo .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 8 - Custo de um funcionário .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 9 - Custo anual de operação .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 10 - Resultados operacionais das instâncias .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 11 - Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 12 - Resultados de performance das instâncias.....</i>	<i>60</i>

## LISTA DE SIGLAS

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

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

2E-CVRP-HFSDTW – *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows*

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*

2E-CVRP-SD – *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands*

VRP-TW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*

ALNS – *Adaptive Large Neighborhood Search*

BP – *Branch-and-price*

CCP – *Centros de Consolidação de Pneus*

CDU – *Centros de Distribuição Urbana*

CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

ICP – *Indicadores Chave de Performance*

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

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
2.1	TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEMS .....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DELINEAMENTO DA PESQUISA .....	29
3.2	CLASSIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO .....	30
3.3	ETAPAS DA PESQUISA.....	31
3.4	O PROBLEMA DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS ESTUDADO .....	32
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>LEVANTAMENTO DOS DADOS E ELABORAÇÃO DE INSTÂNCIAS .....</b>	<b>44</b>
5.1	GERAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS.....	49
5.2	MATRIZ DE DISTÂNCIA.....	51
5.3	VEÍCULOS UTILIZADOS E CUSTOS DE TRANSPORTE .....	51
5.4	CUSTO DE OPERAÇÃO .....	53
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
6.1	ANÁLISE DA REDE LOGÍSTICA REVERSA .....	61
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A – ROTAS ENCONTRADAS EM CADA INSTÂNCIA.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O acúmulo de resíduos sólidos dispostos inadequadamente é um problema ambiental que, embora haja várias iniciativas que buscam minimizar o impacto gerado, não foi ainda totalmente resolvido. Um dos principais resíduos que um veículo automotivo produz durante a sua vida útil é o pneu. Em especial, desde a década de 1970 estudam-se destinos adequados para pneus inservíveis. Até então, este material era disposto em aterros, aglomerado em pilhas em lixões a céu aberto ou queimado. As normas e legislações a respeito eram incipientes.

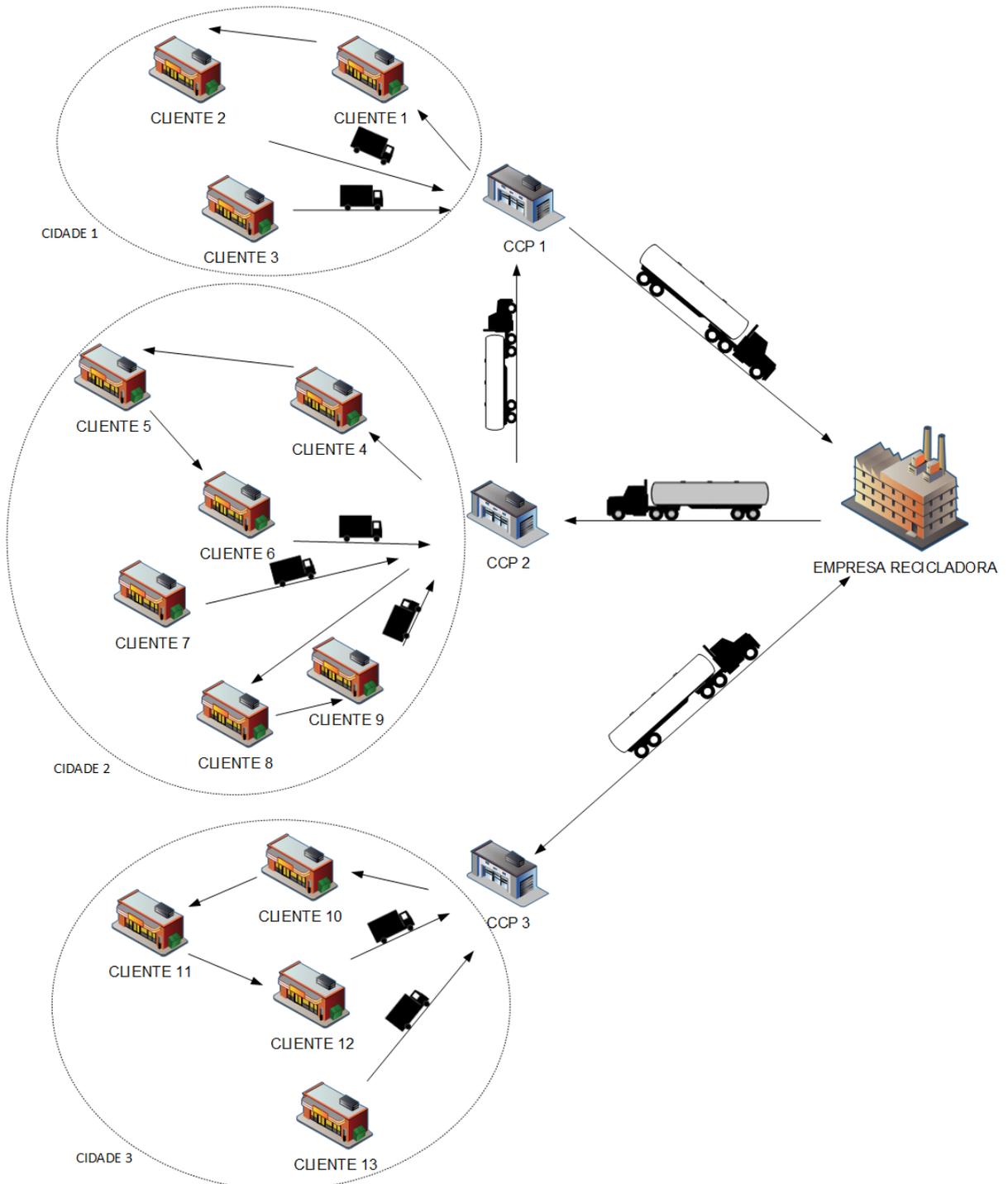
Na medida em que a frota mundial de veículos cresceu, agravaram-se os problemas com relação ao descarte final deste produto. Os pneus possuem tempo de decomposição ainda desconhecido e causam diversos impactos ambientais em função da grande quantidade existente e de sua destinação incorreta. Dentre estes impactos citam-se: o assoreamento de rios, facilitando o risco de enchentes, e a poluição atmosférica devido a liberação, após sua queima, de gases como o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre, metais pesados, dioxinas e furanos (VELOSO, 2016). Além disso, este material pode servir de criadouro para insetos transmissores de doenças, especialmente a dengue.

No Brasil, os primeiros esforços dirigidos à tentativa de minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte de pneus inservíveis começaram a ocorrer a partir de 1990. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) atribuiu a responsabilidade da destinação final dos pneus inservíveis aos fabricantes e importadores de pneus novos (BRASIL, 2010; CONAMA, 1999, 2002, 2009). A Resolução nº 416/2009 estabeleceu o prazo máximo de 12 meses para o armazenamento provisório dos pneus inservíveis antes do seu descarte, destacando que o armazenamento provisório de pneus deve garantir as condições necessárias à prevenção dos danos ambientais e de saúde pública, sendo vedado o armazenamento de pneus a céu aberto.

A importância de questões ambientais vem sendo traduzida continuamente em leis e normas ambientais. Por isso o interesse no campo da logística envolvendo fatores ambientais tem crescido nos meios empresariais e acadêmicos (JABALI et al., 2012). Neste trabalho é apresentado uma aplicação de pesquisa nessa área: a logística reversa estruturada em Centros de Consolidação de Pneus (CCP). Os CCP atuam

como um instrumento para viabilizar a coleta de pneus em áreas urbanas ao setor empresarial, aonde serão reaproveitados. Essas instalações são centros de armazenagem temporária responsáveis por consolidar cargas recebidas de veículos de pequeno porte para serem coletadas por veículos de maior porte. A Figura 1 ilustra a consolidação de pneus em um CCP.

Figura 1 - Consolidação de pneus em um CCP.



Fonte: Adaptado de Fraga (2016).

Um dos problemas de roteamento de veículos que vem atraindo crescente atenção na literatura devido à sua relevância em aplicações na vida real é o *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* (2E-CVRP). Dentre as diversas aplicações práticas que o 2E-CVRP suporta, está a logística reversa por meio do uso de centros de consolidação de cargas. Apesar do 2E-CVRP vir recebendo cada vez mais atenção em periódicos, esse é um problema ainda relativamente pouco explorado, principalmente quando o fator tempo é considerado. Poucos autores estudaram variantes do 2E-CVRP com janela de tempo ou com limite de duração em cada rota (CUDA; GUASTAROBA; SPERANZA, 2015).

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma variação do 2E-CVRP, com a proposição do modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows* (2E-CVRP-HFSDTW), para o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis estruturada em centros de consolidação de pneus (CCP). Este modelo baseou-se no modelo proposto por Fraga (2016) e difere deste por considerar a existência de frota heterogênea nos dois níveis, janela de tempo no 2º nível e restrição na duração total de cada rota nos dois níveis do 2E-CVRP-HFSD.

O modelo proposto foi implementado e testado no caso real da logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, Brasil, com intuito de fornecer matéria-prima para uma indústria que atua no reaproveitamento de pneus para a geração de energia elétrica no município de Cariacica. Foram definidas e testadas 14 instâncias, explorando a capacidade da empresa recicladora, dos tipos de veículos e dos centros de coletas de pneus, o horário de funcionamento dos clientes e a estimativa de geração de pneus inservíveis no Espírito Santo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os impactos gerados pelo descarte incorreto de pneus para o ser humano e para a natureza são indiscutíveis. Estima-se que são descartados anualmente 800 milhões de pneus no mundo. Só aqui no Brasil, são produzidos mais de 40 milhões de pneus por ano. E, infelizmente, praticamente metade desse número é descartada de forma não sustentável no meio ambiente (FRAGMAQ, 2012).

A evolução da legislação ambiental a tem tornado mais fortalecida em relação as questões ambientais e responsabiliza cada vez mais os produtores pela destinação final de produtos pós-venda e pós-consumo. Por isso, a logística reversa vem ganhando cada vez mais importância no meio empresarial e acadêmico.

Assim, este trabalho se justifica por propor uma melhoria no planejamento do fluxo reverso de pneus inservíveis, auxiliando fabricantes e importadores na destinação correta deste produto no pós-consumo, além de contribuir com novos mercados que vem surgindo ao propor soluções para o seu reaproveitamento. Exemplo disso é a empresa de reciclagem que vai se instalar em Cariacica, no Espírito Santo, que irá gerar artefatos de borracha e energia elétrica. A fábrica encurtará as distâncias que estes pneus percorrem para serem destruídos, uma vez que ainda não existe no estado uma unidade de destruição de pneus inservíveis. Em suma, este trabalho contribui ao futuro de toda a sociedade e do meio ambiente à medida que propõe um modelo útil de logística reversa para a retirada de pneus do meio ambiente e sugere uma forma de reaproveitamento de extrema utilidade para a sociedade: a geração de energia elétrica.

Tendo em vista que a maioria das pesquisas sobre os problemas de roteamento de veículos em dois níveis concentram-se em sua versão básica, o 2E-CVRP (CUDA; GUASTARROBA; SPERANZA, 2015), este trabalho se justifica ainda como uma contribuição para a literatura, principalmente ao problema de distribuição em dois níveis com frota heterogênea, restrições de acesso e janela de tempo.

Por fim, considerando a logística urbana, este trabalho se torna relevante visto que propõe o modelo 2E-CVRP-TW, sendo necessário avaliar a demanda para a movimentação de cargas dentro de áreas urbanas e também será conveniente considerar os fluxos reversos da cadeia, o que segundo Crainic *et al.* (2009), tem sido pouco explorado por modelos na literatura.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático para problemas roteamento de veículos em dois níveis aplicado à logística reversa de pneus inservíveis estruturada em CCP, que admita frota heterogênea, restrições de acesso

e janela de tempo.

Dentre os objetivos específicos podemos enumerar: o levantamento quantitativo da geração de pneus utilizados no estado do Espírito Santo; o planejamento logístico para a logística reversa de pneus, determinando as rotas ótimas e a destinação de pneus inservíveis para cada CCP no Espírito Santo, minimizando o custo total de transporte; a aplicação da logística reversa de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo analisando diversos cenários.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo esta introdução. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura sobre o problema de roteamento de veículos em dois níveis e suas variações e a logística reversa de pneus. O Capítulo 3 descreve as classificações em relação à pesquisa e ao modelo matemático proposto, apresenta a maneira como o trabalho foi realizado, além de descrever o problema 2E-CVRP-HFSDTW aplicado ao caso real da logística reversa do estado do Espírito Santo. O Capítulo 4 exhibe o modelo matemático proposto de forma detalhada. O Capítulo 5 mostra como as instâncias e os dados utilizados foram definidos. O Capítulo 6 expõe os resultados e as análises dos resultados obtidos com a realização de testes computacionais. Por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 7.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O roteamento de veículos é um problema de otimização combinatória NP-*hard* que possui alta ligação à área logística, uma vez que a diminuição de custos é uma preocupação constante das cadeias de suprimentos (COELHO, 2017). A logística urbana trata comumente o problema de roteamento de veículos como sendo de múltiplos níveis, uma vez que esta é uma das formas mais eficientes de se implementar sistemas de distribuição em centros urbanos, dado suas grandes vantagens ambientais. Na literatura, os problemas de sistemas de distribuição de múltiplos níveis mais implementados são os de dois níveis, denominados *two-echelon vehicle routing problems* (2E-VRP). No primeiro nível, os fretes são realizados por veículos de grande porte e partem de um depósito central com destino às instalações satélites, que são centros de distribuição e consolidação de cargas. No segundo nível, os fretes são conduzidos dos satélites aos clientes finais por meio de veículos de menor porte (HEMMELMAYR; CORDEAU; CRAINIC, 2012; MANCINI 2013).

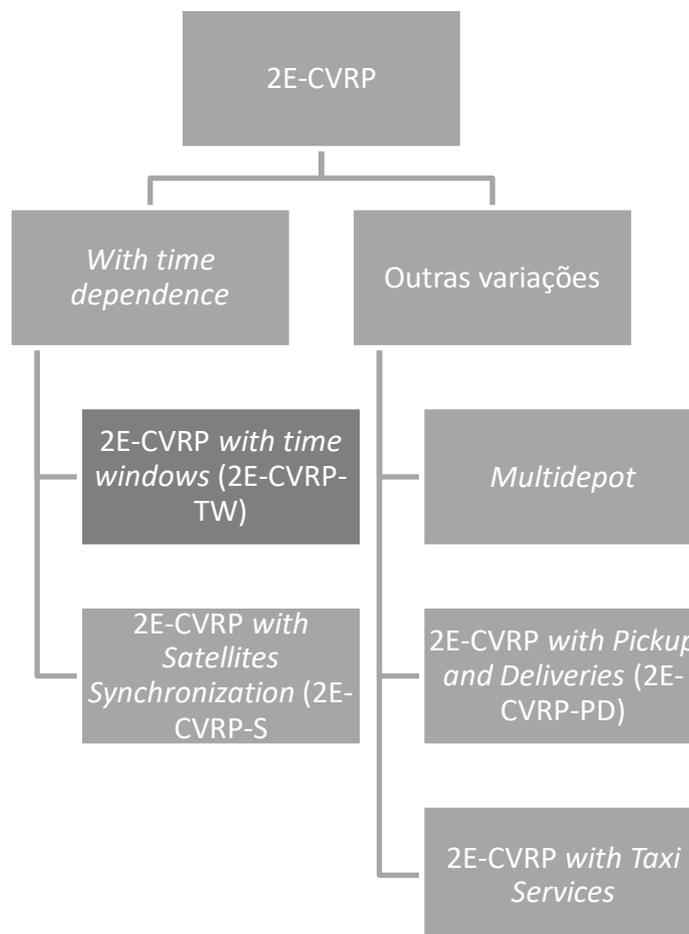
Essa abordagem é muito aplicada à logística urbana porque além de determinar rotas ótimas no atendimento de demandas de clientes, reduzindo os custos globais de transporte, mantém de forma eficiente os veículos de grande porte fora dos centros urbanos (Crainic *et al.*, 2008a). Com isso, consegue-se diminuir os transtornos com congestionamento, níveis de ruído e com a poluição atmosférica causados pelo transporte de cargas dentro das cidades.

Perboli, Tadei e Vigo (2011) apresentaram uma taxonomia para os 2E-CVRP conforme esboça a Figura 2. Segundo eles, o *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* é a variação mais básica do 2E-VRP, onde as entregas são obrigatoriamente realizadas através de satélites. As variações *Time dependence* consistem nos problemas *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* e *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with satellites synchronization*. No 2E-CVRP-TW é considerado que cada cliente pode definir uma janela de tempo para que se dê início a coleta/entrega de produtos. A janela de tempo pode ser do tipo *hard*, não podendo ser violada, ou do tipo *soft*, podendo ser violada mediante a aplicação de um custo. Já o 2E-CVRP-SS é uma extensão do 2E-CVRP em que as chegadas e saídas nos satélites sofrem restrições de tempo. Devido à falta de capacidade de armazenamento em satélites, as cargas que chegam aos satélites

por meio de veículos do 1º nível devem ser imediatamente carregadas em veículos do 2º nível para serem entregues aos clientes, ou seja, os dois veículos devem estar no satélite ao mesmo tempo. As restrições também podem ser do tipo *hard* ou *soft*, assim como no 2E-CVRP-TW (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011; FRAGA, 2016).

As demais variações do 2E-CVRP consideradas são: 1) *Multidepot*, 2) *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Pickup and Deliveries* e 3) *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Taxi Services*. Na variação *Multidepot* os satélites podem ser atendidos por mais de um depósito. 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 *with Taxi Services* permite o transporte direto do depósito para os clientes caso isso diminua o custo, satisfaça a janela de tempo ou a sincronização (PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011; FRAGA, 2016).

Figura 2 - Taxonomia do 2E-CVRP segundo Perboli, Tadei e Vigo (2011)



Fonte: Adaptado de Fraga (2016)

O próximo subcapítulo se destina à uma revisão da literatura ao 2E-CVRP.

## 2.1 TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEMS

Crainic *et al.* (2008a) introduziram e compararam os resultados das meta-heurísticas *Split-large-route*, *Add* e *Exchange* na resolução do 2E-CVRP. A resolução do problema foi dividida em duas fases: a primeira fase solucionou o primeiro nível do problema que é tratado como um VRP; a segunda fase solucionou o segundo nível do problema, que é tratado como um *multi depot* VRP ou vários VRP pequenos. Foram considerados dois conjuntos de seis pequenas instâncias. Os resultados mostraram que métodos exatos conseguem resolver instâncias pequenas, porém, a medida que o tamanho das instâncias aumenta se faz necessário o uso de heurísticas.

Crainic *et al.* (2010a) apresentaram uma família de heurísticas *Multi-Start* para resolver o 2E-CVRP. Este problema foi separado em dois subproblemas, o de primeiro e o de segundo nível, e cada nível foi resolvido separadamente e sequencialmente, num processo iterativo, com o uso de heurísticas de *clustering* e abordagem de busca local. Estas heurísticas desenvolvidas foram comparadas com as duas *math-heuristics* apresentadas por Perboli, Tadei e Vigo (2008). Os resultados mostraram que as *Multi-Start heuristics* superaram as *math-heuristics*, tanto em eficiência quanto na eficácia.

Perboli, Tadei e Tadei (2010) introduziram várias classes de inequações na formulação do 2E-CVRP, ampliando a literatura do *capacitated vehicle routing problem*. O método implementado na resolução do problema foi o *Branch & Cut*. Afim de comparar os resultados com a literatura, os autores fizeram uso do mesmo conjunto de instâncias utilizados por Perboli, Tadei e Vigo (2008) e Crainic *et al.* (2008b), com instâncias de até 50 clientes e 5 satélites. Foi concluído que o *Branch & Cut* superou o modelo introduzido por Perboli, Tadei e Vigo (2008), tanto na precisão quanto no número de soluções ótimas, e que o método escolhido foi capaz de otimizar todas as instâncias.

Perboli, Tadei e Vigo (2011) contribuíram com um modelo PLIM e com desigualdades válidas para solucionar o 2E-CVRP. O modelo e as desigualdades foram testadas em quatro conjuntos de instâncias, que cobriam mais de 51 nós (1 depósito e 50 clientes),

baseadas no trabalho de Christofides e Eilon (1969) e Crainic et al. (2010a). Os resultados mostraram um bom comportamento do modelo para instâncias de pequeno e médio porte. Por fim, foram apresentadas as heurísticas *clustering-based* e *Math-Based* baseadas no PLIM. Ambas as heurísticas apresentaram bom desempenho computacional e boa qualidade das soluções encontradas.

Um algoritmo híbrido *ant colony optimization* que combina três heurísticas foi proposto e aplicado por Meihua et al. (2011) para resolver o 2E-CVRP. A resolução do problema foi realizada em três fases: a primeira fase consistia em dividir o problema em subproblemas de roteamento CVRP. Na segunda fase, foi realizada a otimização desses CVRP aplicando uma meta-heurística *ant colony optimization* melhorada pela heurística *Multiple Neighborhood Descent*. Por fim, na terceira e última fase, foi aplicado a meta-heurística *Threshold-Based Local Search* para melhorar a solução viável encontrada na segunda fase. Esse método foi comparado com os trabalhos de Feliu et al. (2007) e Crainic et al. (2008a). Em relação ao trabalho de Feliu et al. (2007), o algoritmo híbrido obteve 12 melhores soluções e 4 soluções idênticas em um total de 21 instâncias. Já comparado com o trabalho de Crainic et al. (2008a), o algoritmo obteve 6 melhores soluções e uma mesma solução em um total de 12 instâncias. Foi concluído que as meta-heurísticas desenvolvidas melhoram a qualidade da solução e aceleram a convergência do algoritmo.

Crainic et al. (2012) utilizaram a meta-heurística GRASP, que é pós-otimizada por meio de um procedimento de busca local, combinado com o procedimento *Path Relinking*. Quando o método GRASP não garantia a viabilidade da solução obtida, uma solução viável era reconstruída através do procedimento de busca de viabilidade. Este artigo também tratou o problema separando a transferência de depósito para satélite e a entrega de satélite para cliente, resolvendo iterativamente os dois subproblemas de roteamento resultantes. A meta-heurística introduzida no artigo foi testada em instância de médio porte com até 50 clientes e 5 satélites e comparado com os resultados encontrados em Perboli e Tadei (2010) e Perboli, Tadei e Vigo (2011). Foi concluído que os resultados dessa meta-heurística podem ser melhores em eficiência do que os resultados obtidos por Perboli, Tadei e Vigo (2011). Porém, quanto à performance computacional, a meta-heurística apresentou menor desempenho de processamento que os métodos propostos por Perboli e Tadei (2010) e Perboli, Tadei e Vigo (2011).

Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012) propuseram a meta-heurística ALNS para o *two-echelon capacitated vehicle routing problem* e o *location routing problem* no contexto da logística urbana. Eles testaram a heurística em instâncias de referência da literatura do 2E-CVRP e os resultados mostraram que dentre as 93 instâncias testadas, 59 apresentaram melhores soluções se comparados aos trabalhos de Perboli e Tadei (2010), Perboli, Tadei e Vigo (2011) e Crainic et al. (2010a).

A variação *Symmetric Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* do 2E-CVRP foi estudada por Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013). Nesta, os satélites localizam-se em nós de mesma distância entre si e entre um depósito central. Para a resolução do problema eles propuseram o algoritmo *branch and-cut* baseado em um modelo matemático não trivial que fornece um limite inferior estreito. Os experimentos foram executados em grupos de instâncias com 21, 32 e 50 clientes introduzidas por Feliu et al. (2007) e por Crainic et al. (2010a). Resultados computacionais indicaram que o algoritmo proposto superou os de Perboli, Tadei, e Vigo (2011) e Perboli, Tadei, e Masoero (2010), sendo capaz de resolver 47 das 93 instâncias utilizadas, dentre as quais 34 foram otimizadas pela primeira vez.

Baldacci, Mingozzi e Roberti (2013) desenvolveram um algoritmo que 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. Este algoritmo consiste em um modelo matemático com base em PD, em um método *dual-ascent* e um algoritmo exato para resolver o 2E-CVRP. O método proposto foi testado em 207 instâncias, sendo 153 encontradas na literatura e as outras 54 instâncias criadas pelos próprios autores. Comparações entre esse algoritmo e os introduzidos por Perboli, Tadei e Vigo (2011) e Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013), em instâncias de até 100 clientes e seis satélites, mostraram que o novo método supera os demais em termos de tamanho, número de problemas de otimização resolvidos e tempo de execução do modelo.

Um modelo de programação linear inteira e duas implementações da heurística *branch-and-price* foram consideradas por Santos, Da Cunha e Mateus (2013) na resolução do 2E-CVRP. A primeira 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. Foram utilizadas 114 instâncias de referência do VRP e do 2E-CVRP, para um único depósito e até 51 clientes. A heurística BP-E mostrou-se capaz de chegar a melhores soluções inteiras e a heurística BP-NE apresentou menores gaps, quando era 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).

Ainda no contexto da logística urbana, Zheng *et al.* (2014) solucionaram o 2E-CVRP utilizando uma heurística híbrida composta por um GRASP - incorporado ao *route-first cluster-second procedure* para gerar soluções viáveis - e um VND. A interação GRASP+VND gera e melhora de forma independente um número de soluções iniciais e, por fim, retorna a melhor solução obtida durante toda a pesquisa. Este algoritmo híbrido foi testado em um conjunto de três instâncias de referências publicados por Perboli, Tadei e Vigo (2011) e por Crainic *et al.* (2010b).

Soysal, Bloemhof-Ruwaard, Bektaş (2015) apresentaram uma abrangente formulação de programação linear inteira mista para *time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem* aplicado à um estudo de caso na cadeia de suprimentos de um supermercado em *Netherlands*. Um conjunto de versões do modelo, com diferentes funções objetivo, foi testado para se produzir um conjunto relevante de indicadores de performance (KPI) em relação à distância, tempo, consumo de gasolina e custo. Os resultados computacionais mostraram que as rotas resultantes e a performance das soluções em relação aos KPI mudaram de acordo com a versão do modelo. Além disso, em relação ao caso de estudo, foi comprovado que a solução mais ambientalmente correta foi obtida através do uso do *two-echelon distribution system*, embora um *single-echelon distribution system* forneça uma solução com um menor custo.

Dellaert *et al.* (2016) propuseram dois modelos matemático *path-based* para o 2E-CVRP-TW: no primeiro modelo *path-based* as rotas foram definidas como sendo de primeiro e de segundo nível; no segundo modelo *path-based* as rotas do primeiro e do segundo nível foram decompostas. Algoritmos *branch-and-price* foram desenvolvidos para ambos os modelos. Os autores compararam todos os modelos e métodos de solução utilizados em um conjunto abrangente de instâncias com até 5

satélites e 100 clientes, sendo o primeiro artigo na literatura que conseguiu resolver instâncias tão grandes.

Grangier *et al.* (2016) utilizaram a heurística ALNS para resolver uma variante do 2E-CVRP que integra as seguintes restrições que surgem no contexto da logística urbana: janela de tempo, sincronização de satélites e a permissão de múltiplas viagens no segundo nível. Este problema foi denominado *two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization* (2E-MTVRP-SS). Como o 2E-MTVRP-SS é um problema novo, os autores tiveram que adaptar as instâncias utilizadas por Solomon (1987) em um VRP-TW. Os testes realizados no modelo resultaram em boas soluções com tempo de execução razoável. Em relação à solução do problema, foi concluído que as janelas de tempo possuem maior influência do que a sincronização de satélites no custo total.

Wang, Lan e Zhao (2017) abordaram o problema de roteamento de veículos capacitados em dois níveis com demandas estocásticas, o *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands* (2E-CVRP-SD), na logística urbana. Neste problema, entregas fracionadas são permitidas no primeiro nível, mas não são no segundo nível, tendo que se calcular o custo esperado de falhas em rotas. O modelo matemático *route-based* foi construído para descrever o problema estocástico. Para resolver o 2E-CVRP-SD os autores introduziram uma abordagem do algoritmo genético (GA) adaptado às características do problema e utilizaram um total de cinco conjuntos de instâncias sumarizadas por Breunig *et al.* (2015). Devido à falta de pesquisa sobre 2E-CVRP-SD, foram comparadas as melhores soluções encontradas pelo GA com as soluções mais conhecidas do 2E-CRVP na literatura, permitindo medir o benefício de se considerar demandas estocásticas em processos de tomada de decisão. Os resultados numéricos validaram a eficácia do algoritmo.

Esmaili e Sahraeian (2017) estudaram pela primeira vez o 2E-CVRP levando em consideração a satisfação de clientes em entregas de produtos perecíveis e questões ambientais. O artigo propôs um modelo com função objetivo dividida em duas partes, que minimiza o tempo de espera dos clientes nas entregas dos produtos e o custo total das viagens. Foi considerada ainda uma restrição contendo a emissão máxima de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) permitida em cada rota. Na resolução do problema foi proposto um PLIM e o método *Simple Additive Weighting* (SAW). Este modelo foi

implementado num estudo de caso em uma cadeia de suprimentos de um supermercado em *Netherlands*, contendo 1 depósito, dois satélites e 16 clientes. Os resultados enfatizaram o bom desempenho do modelo em relação a cada função objetivo e que o mesmo é apropriado apenas para instâncias com no máximo dois satélites. Além disso, a análise de sensibilidade realizada no modelo revelou que políticas menos restritivas sobre as emissões de carbono levam à uma maior emissão de CO<sub>2</sub>, mas, em contrapartida, geram um menor custo total de viagem e tempo de espera dos clientes. Os autores atestaram ainda que o uso de restrições com janelas de tempo no modelo poderia gerar resultados ainda mais realistas.

Song, Gu e Huang (2017) abordaram uma variante do clássico 2E-CVRP, o *adaptive two-echelon capacitated vehicle routing problem (A2E-CVRP)*. Comparando com o 2E-CVRP, o A2E-CVRP possui vários depósitos e permite que os veículos atendam clientes diretamente dos depósitos. Este artigo forneceu um modelo PLIM. Os autores utilizaram um *lower bound* baseado no proposto por Baldacci *et al.* (2013), e depois, usaram o *lower bound* para obter o *upper bound*, que também é uma solução aproximada do A2E-CVRP. Testes no modelo foram realizados utilizando instâncias encontradas em Baldacci *et al.* (2013) e resultados indicaram que houve uma melhoria nos custos das rotas em comparação ao 2E-CVRP.

Em relação às revisões de literatura sobre o 2E-CVRP, foram encontrados dois trabalhos descritos a seguir

Mancini (2013) revisa os problemas de roteamento de veículo em múltiplos níveis no contexto da logística urbana, inclusive o 2E-CVRP. Além disso, ele apresenta os métodos de otimização desenvolvidos para a resolução desses problemas e, ainda, analisa a adaptabilidade das classes mais comuns de meta-heurísticas aos problemas levantados.

Cuda, Guastaroba e Speranza (2015) fizeram um estudo da arte sobre *Two-echelon Routing Problems*, classificando esse problema em três classes: o *two-echelon location routing problems*, o *two-echelon capacitated vehicle routing problems* e o *truck and trailer routing problems*. Para cada classe eles deram uma descrição geral do problema, identificaram as principais variantes abordadas pela literatura e revisaram as soluções exatas e heurísticas propostas.

A Tabela 1 representa o resumo da revisão de literatura realizada nesta seção. A coluna 'Autor' 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' e 'Revisão', e indicam se o artigo abordou modelagem matemática, heurística, meta-heurística, e/ou estudo de arte em seu trabalho, respectivamente (FRAGA, 2016).

Tabela 1 - Resumo da Revisão de Literatura

(contínua)

Autor	Variação	Método			
		Mod. Mat.	Heurística	Meta-heurística	Revisão
Crainic <i>et al.</i> (2008a)	2E-CVRP			■	
Crainic <i>et al.</i> (2010a)	2E-CVRP		■		
Perboli, Tadei e Tadei (2010)	2E-CVRP	■			
Meihua <i>et al.</i> (2011)	2E-CVRP			■	
Perboli, Tadei e Vigo (2011)	2E-CVRP	■		■	
Crainic <i>et al.</i> (2012)	2E-CVRP			■	
Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012)	2E-CVRP			■	
Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2012)	2E-CVRP		■		
Baldacci, Mingozzi e Roberti (2013)	2E-CVRP	■	■		
Mancini (2013)	2E-CVRP				■
Santos, Da Cunha e Mateus (2013)	2E-CVRP	■			
Zheng <i>et al.</i> (2014)	2E-CVRP		■		

Tabela 1 - Resumo da Revisão de Literatura

(continuação e conclusão)

Autor	Variação	Método			
		Mod. Mat.	Heurística	Meta-heurística	Revisão
Cuda, Guastaroba e Speranza (2015)	2E-CVRP				
Soysal, Bloemhof-Ruwaard, Bektaş (2015)	2E-CVRP-TW				
Dellaert et al. (2016)	2E-VRP-TW				
Grangier et al. (2016)	2E-MTVRP-SS				
Esmaili e Sahraeian (2017)	2E-CVRP				
Song, Gu e Huang (2017)	2E-CVRP				
Wang, Lan e Zhao (2017)	2E-CVRP				

Fonte: Adaptado de Fraga (2016)

### 3 METODOLOGIA

A construção lógica de um projeto consiste em organizar as ideias com vista a atender aos objetivos, esclarecendo o roteiro no qual o trabalho será realizado (GIL, 2002). Em outras palavras, o delineamento da pesquisa é uma forma de apresentar aos leitores como a pesquisa foi realizada em âmbito geral, além de tornar a execução da metodologia mais fácil ao pesquisador. Assim, esta seção se dedica a apresentar os critérios nos quais esta pesquisa foi estruturada e realizada, além de classificar cada um desses critérios.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DELINEAMENTO DA PESQUISA

A classificação desta pesquisa foi realizada através do uso dos critérios de delineamento básico apresentados por Prodanov e Freitas (2013). A Figura 3 apresenta a taxonomia utilizada no planejamento desta pesquisa.

Figura 3 - Critérios de delineamento da pesquisa



A natureza desta pesquisa é definida como aplicada, pois procura produzir conhecimentos a partir da aplicação prática do 2E-CVRP com janela de tempo e restrições de acesso dirigido à solução do problema de coleta e destinação adequada de pneus inservíveis.

Em relação ao critério objetivo, esta pesquisa se classifica como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema 2E-CVRP-TW através de análises de exemplos semelhantes na literatura.

No âmbito dos procedimentos técnicos, esta pesquisa é classificada como experimental, pois ao se utilizar modelagem matemática e *softwares* de otimização consegue-se propor cenários que seriam impossíveis de se simular empiricamente.

Por último, a abordagem é quantitativa porque as informações geradas pela utilização do modelo são traduzidas em números. Através dos resultados da aplicação do modelo podemos realizar:

1. A comparação entre os diferentes cenários do problema, por meio do valor da função objetivo que é um poderoso parâmetro;
2. A avaliação da eficácia do modelo em relação às restrições, através dos resultados de fluxo de carga que flui entre cada nó;
3. A comparação entre diferentes modelos e *softwares* de otimização por meio do tempo de execução de cada instância em análise.

### 3.2 CLASSIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

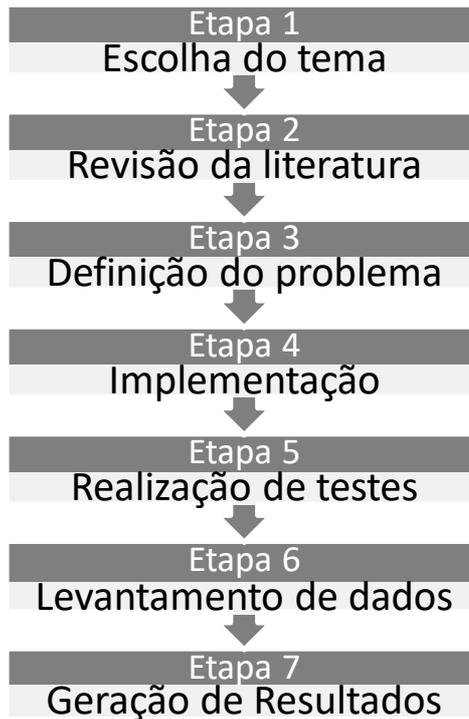
Este trabalho propõe um modelo matemático para o problema de roteamento de veículos capacitado em dois níveis com janela de tempo. Conforme ilustra a Figura 2, o 2E-CVRP-TW é uma extensão do 2E-CVRP onde são consideradas janelas de tempo nos clientes. Em suma, nesta variação do 2E-CVRP cada cliente ou satélite pode definir um intervalo de tempo limitado para que se dê início a coleta/entrega dos produtos.

Em relação ao método de resolução do problema, a resolução do *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows* proposto neste trabalho foi realizada pelo método exato programação linear inteira, utilizando o *solver* CPLEX 12.6.

### 3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Esta pesquisa foi planejada e executada de acordo com as sete etapas utilizadas por Fraga (2016), representadas pela Figura 4 abaixo, a fim de se atingir os objetivos propostos.

Figura 4 - Etapas da Pesquisa



Fonte: Adaptado de Fraga (2016).

Na Etapa 1 deste trabalho foi realizada a escolha de um tema que o problema de roteamento de veículos suportasse. Foi escolhido o 2E-CVRP-TW.

Na Etapa Revisão da Literatura foram pesquisados apenas artigos científicos relevantes publicados em inglês na área do 2E-CVRP e suas variações, com o intuito de conferir na literatura o que já foi publicado e descobrir as lacunas na área. Após isso, foi realizada a escolha de um modelo matemático que servisse de base para o desenvolvimento deste trabalho.

Na Etapa 3 foi definido o escopo do problema a ser implementado pelo modelo matemático proposto com base no modelo escolhido na Etapa 2. Em seguida, foi realizada a implementação do modelo para o 2E-CVRP-TW com o uso do *so/ver* IBM ILOG CPLEX Optimizer 12.6.

Em se tratando da etapa de realização de testes, foram definidas instâncias de teste para os parâmetros: quantidade de satélites e clientes, matriz de distância, tamanho e capacidade das frotas heterogênea (1º nível e 2º nível), capacidade dos satélites, custos de transporte e de operação, demanda e restrições de acesso dos clientes, janela de tempo dos clientes e a estimativa de geração de pneus inservíveis no Espírito Santo. O modelo foi testado com as instâncias definidas.

Já no levantamento dos dados, foram coletados os dados reais necessários à resolução do problema e definida as instâncias.

Por fim, na Etapa VII, foram gerados os resultados com a aplicação dos dados coletados na Fase VI no modelo implementado na Fase IV. Os resultados das diferentes instâncias rodadas foram comparados e analisados.

#### 3.4 O PROBLEMA DA LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS ESTUDADO

Este trabalho de conclusão de curso propõe a resolução do problema de roteamento em dois níveis da cadeia logística reversa de pneus inservíveis para o estado do Espírito Santo, Brasil. Para tal, foram determinados possíveis cenários para essa cadeia, levando em consideração a futura instalação de uma empresa recicladora em Cariacica, no Espírito Santo, numa área da Rodovia do Contorno, no condomínio da Marca Ambiental.

A logística reversa de pneus proposta tem início quando um pneu chega ao fim de sua vida útil e ele deve ser deixado em um local apropriado. O descarte apropriado 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, da onde serão conduzidos à empresa recicladora de pneus. Esta empresa está em fase de implantação e utilizará os pneus para serem queimados e, assim, gerar energia elétrica (FRAGA, 2016).

Foi considerada a cadeia logística reversa a partir dos pontos de coleta até a empresa recicladora com a existência de CCP para a consolidação de pneus entre os pontos de coleta e a empresa recicladora. Sendo assim, os pontos de coleta são os locais

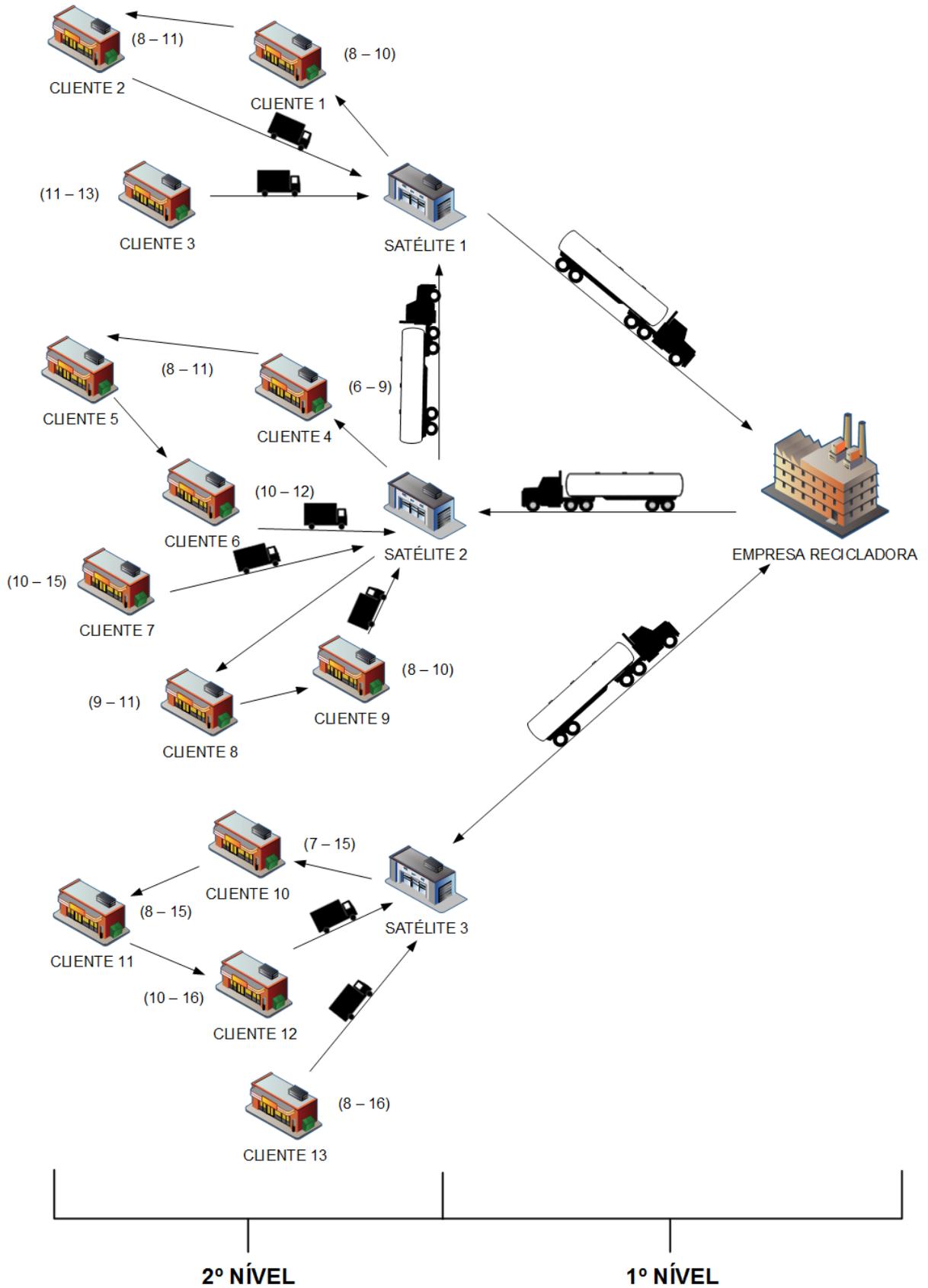
para onde os consumidores, borracheiros e os comerciantes, encaminham os pneus inservíveis. Desta forma, os CCP são responsáveis pela consolidação e pelo transporte de pneus coletados em vários pontos de coleta até a empresa recicladora.

Fazendo um paralelo entre a cadeia reversa de pneus inservíveis e o sistema de distribuição *two-echelon*, a empresa recicladora de pneus é o depósito, os CCP são os satélites e os pontos de coleta são os clientes. A cadeia proposta foi modelada em dois níveis e sua ilustração pode ser vista na Figura 5, nessa figura os valores entre parênteses em cada cliente corresponde a janela de tempo desse cliente.

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

Sendo assim, os veículos vazios, pertencentes ao 2º nível, partem dos satélites e visitam cada cidade cliente dentro de uma janela de tempo onde os pneus inservíveis são coletados e levados para o satélite de origem. Depois disso, o fluxo no 1º nível se inicia. No 1º nível, os veículos vazios, pertencentes ao 1º nível, partem da empresa recicladora em direção aos satélites e coletam os pneus inservíveis processados e, só assim, retornam à empresa recicladora e descarregam os pneus para que possa ser realizada a reciclagem. Nos satélites os pneus coletados pelos veículos do 2º nível são consolidados pelos veículos do 1º nível (FRAGA, 2016).

Figura 5 - Representação da rede de logística reversa do pneu

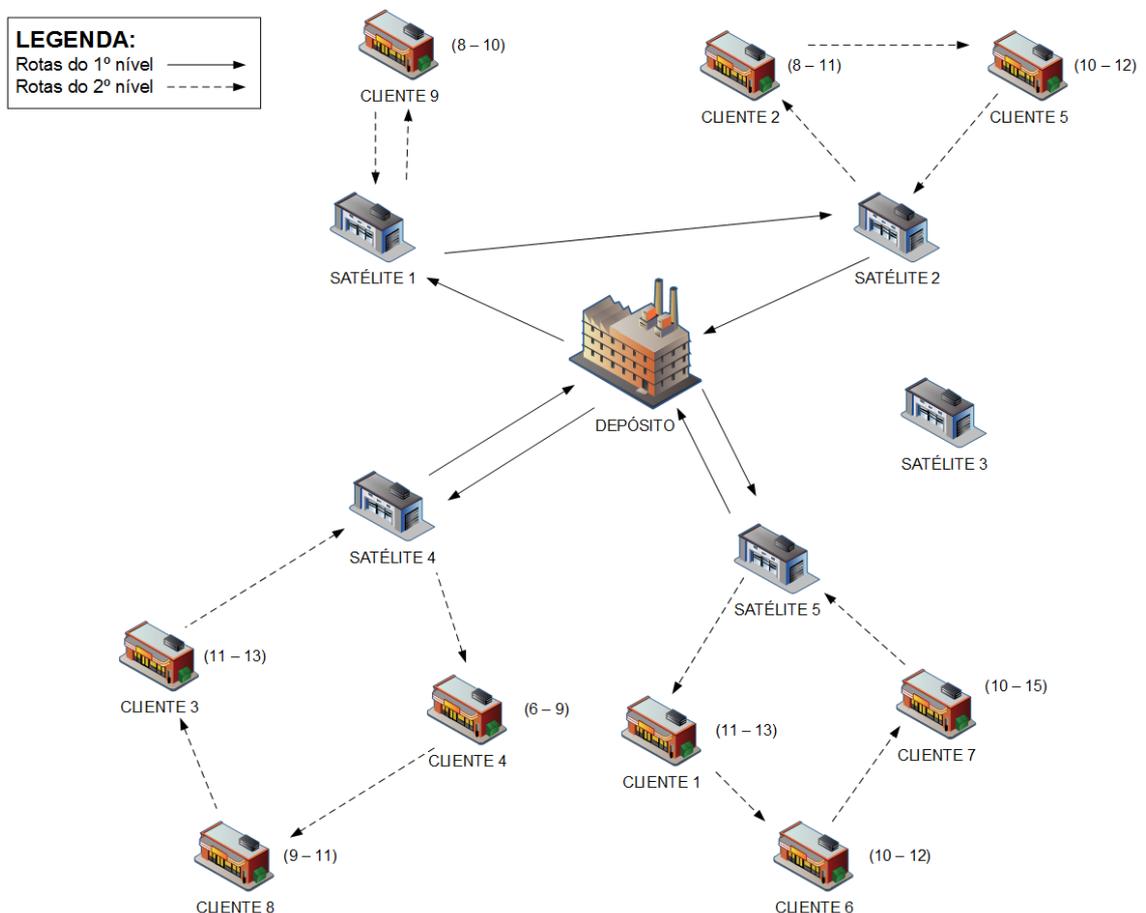


Fonte: Adaptado de Fraga (2016).

#### 4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto neste trabalho, denominado como *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows (2E-CVRP-HFSDTW)*, é um problema de roteamento de veículos em dois níveis que realiza a coleta de mercadorias de um número conhecido de clientes com destino a um depósito, com o auxílio de um número fixo de depósitos intermediários, chamados satélites. O 1º nível de um sistema de distribuição em dois níveis é composto pelo depósito e pelos satélites e o 2º nível é composto pelos satélites e pelos clientes. O depósito e os satélites possuem uma frota heterogênea de veículos, chamados de veículos de 1º nível e de 2º nível, respectivamente. A localização dos satélites é conhecida e diferentes satélites podem ter diferentes capacidades, conseguindo-se mensurar a capacidade de um satélite por meio da capacidade total de sua frota. A Figura 6 apresenta a esquematização do problema em estudo.

Figura 6 - Distribuição 2E-CVRP-HFSDTW



Fonte: Adaptado de Fraga (2016).

As rotas do 2º nível iniciam-se com veículos do 2º nível partindo dos satélites em direção aos clientes, a fim de coletar produtos de pós-consumo. Cada cliente deve ser visitado somente uma vez e deve ser respeitado sua janela de tempo, na Figura 6 acima essa janela de tempo está representada pelos números entre os parênteses, por exemplo, a janela de tempo do cliente 1 é de 11 horas as 13 horas, isso significa que o veículo só pode recolher os pneus deste cliente das 11 horas as 13 horas. Após todos os clientes serem visitados, os veículos do 2º nível retornam ao satélite de origem. A coleta de pneus nos clientes ocorre durante o dia, considerando uma jornada de trabalho do motorista de 8 horas, de 8 às 18 horas. Já 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, no 1º nível, coletas fracionadas, ou seja, um veículo pega uma parcela do total de pneu contidos em um determinado satélite e outro veículo pega a quantidade de pneus restante deste satélite. Isso faz com que o veículo consiga atingir toda a sua capacidade de carregamento, aumentando a eficácia no carregamento. O recolhimento nos satélites para usina geradora de energia (depósito) ocorre durante a noite, no período de 18 às 2 horas da manhã, considerando uma jornada de trabalho de 8 horas do motorista. Assim, o tempo de ciclo diário da operação é de 16 horas.

A operação nos satélites é realizada da seguinte forma: os veículos do 2º nível são descarregados possibilitando o carregamento dos veículos do 1º nível. Essa operação é realizada com um custo proporcional à quantidade de carga manuseada, uma vez que está sendo considerado a coleta de apenas um tipo de produto. Por fim, após os veículos do 1º nível serem carregados, estes devem retornar ao depósito para que a destinação final dos produtos coletados seja realizada adequadamente. O 2E-CVRP-HFSDTW apresenta restrições referentes a capacidade dos veículos que pertencem as frotas dos dois níveis, restrições referentes a capacidade dos satélites, restrições de acesso de certos tipos de veículos a alguns pontos de coleta, restrições referentes a janela de tempo no 2º nível que controla o horário que cada cliente pode ser atendido e restrição referentes ao limite de tempo máximo de viagem permitido para os veículos nos dois níveis.

O modelo matemático proposto neste trabalho tem como objetivo determinar as rotas

ótimas para os dois níveis do problema e quais serão os satélites utilizados, de forma que as restrições de capacidade dos veículos e dos satélites, as restrições de acesso, as restrições de janela de tempo e de tempo máximo de viagem nos dois níveis sejam respeitadas, com a minimização do custo de coleta nos dois níveis. Este custo é composto pelo custo de transporte fixo e variável das rotas do 1º e do 2º nível e do custo de operação em cada satélite utilizado.

Convencionalmente, o 2E-CVRP-HFSDTW 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;

$\psi$ : 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;

$l_y$ : capacidade de cada veículo  $y \in Y$ ;

$\lambda_z$ : 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  $s \in S$ ;

$e_y$  : custo fixo de transporte do 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 pode ser compartilhada com outros satélites;

$\bar{Y}_{ij}$  : tempo de viagem do veículo  $y \in Y$  no arco  $(i, j) \in W$  do 1º nível;

$\hat{y}_{ij}$  : tempo de viagem de um veículo  $z \in Z$  em um arco  $(i, j) \in X$  do 2º nível;

$tws_i$  : término da janela de tempo do cliente  $i \in C$  do 2º nível;

$twe_i$  : início da janela de tempo do cliente  $i \in C$  do 2º nível;

$Tmx$  : tempo máximo de viagem em uma rota do veículo  $y \in Y$  do 1º nível;

$Tmax$  : tempo máximo de viagem em uma rota do veículo  $z \in Z$  do 2º nível;

$op$  : tempo de carga/descarga de um pneu.

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.

$\alpha_{ijy}$ : 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;

$\eta_{sy}$ : quantidade de carga coletada no satélite  $s \in S$  por um veículo  $y \in Y$  vindo do depósito;

$\mu_{sy}$ : define a posição do satélite  $s \in S$  na rota do veículo  $y \in Y$ .

$u_y$ : variável binária que possui valor igual a 1 se um veículo  $y \in Y$  é utilizado e possui valor 0 em caso contrário;

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

$\phi_{ijsz}$ : 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  $s \in S$ ;

$\beta_{ijsz}$ : 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;

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

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

$T_{iz}$ : tempo acumulado do serviço de um veículo  $z \in Z$  em um cliente  $i \in C$  do 2º nível.

Com base nos conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão apresentados, a função objetivo e as restrições do modelo 2E-CVRP-HFSDTW proposto são apresentadas a seguir.

#### Função Objetivo

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

#### Restrições

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\phi_{ijsz} \leq \lambda_z \beta_{ijsz} \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z, r_z = s \quad (19)$$

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

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

$$T_{(j+a)z} \geq T_{iz} + ((\hat{y}_{i(j+a)} + op d_i) \beta_{i(j+a)sz} - (M(1 - \beta_{i(j+a)sz}))) \quad \forall s \in S, i \in X, j \in C, k \in K, r_z = s, i \neq j \quad (22)$$

$$T_{sz} \geq 0 \quad \forall s \in S, z \in Z \quad (23)$$

$$T_{(i+a)z} \leq twe_i \sum_{s \in S \mid r_z = s} \sum_{j \in X} \beta_{(i+a)jsz} \quad \forall i \in C, z \in Z \quad (24)$$

$$T_{(i+a)z} \geq tws_i \sum_{s \in S \mid r_z = s} \sum_{j \in X} \beta_{(i+a)jsz} \quad \forall i \in C, z \in Z \quad (25)$$

$$\sum_{i \in X} \sum_{j \in C} (\hat{y}_{i(j+a)} + 2 op d_i) \beta_{i(j+a)sz} \leq T_{max} \quad \forall s \in S, z \in Z, r_z = s \quad (26)$$

$$\sum_{(i,j) \in W} \bar{y}_{ij} \alpha_{ijy} + \sum_{s \in S} op \eta_{sy} \leq T_{mx} \quad \forall y \in Y \quad (27)$$

$$u_y = \sum_{\{s \in S \mid s \neq j\}} \sum_{j \in Y} \alpha_{sjy} \quad \forall y \in Y \quad (28)$$

$$\eta_{sy} \geq 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (29)$$

$$\mu_{sy} \geq 0 \quad \forall s \in S, y \in Y \quad (30)$$

$$\phi_{ijsz} \geq 0 \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z \quad (31)$$

$$\tau_s \geq 0 \quad \forall s \in S \quad (32)$$

$$\alpha_{ijy} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in W, y \in Y \quad (33)$$

$$\beta_{ijsz} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, (i, j) \in X, z \in Z \quad (34)$$

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  $y \in Y$  visite 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  $l_y$  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  $\psi$  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  $\lambda_z$  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), (23), (24) e (25) garantem que cada cliente  $i \in C$  seja atendido dentro de sua janela de tempo  $(tws_i, twe_i)$ . As restrições (26) e (27) garantem que o limite máximo de viagem nas rotas dos veículos do 1º nível e do 2º nível, respectivamente, sejam respeitadas.

As Restrições (28) indicam quais veículos do 1º nível foram utilizados no roteamento, e, as Restrições (29) a (34) determinam o domínio das variáveis, sendo  $\eta_{sy}$ ,  $\mu_{sy}$ ,  $\phi_{ijsz}$  e  $\tau_s$  variáveis maiores ou iguais a zero e  $\alpha_{ijy}$  e  $\beta_{ijsz}$  variáveis binárias.

## 5 LEVANTAMENTO DOS DADOS E ELABORAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Neste trabalho são apresentadas 14 instâncias, divididas em dois grupos: Grupo 1 com instâncias de 1 a 7 e Grupo 2 com instâncias 8 a 14. Em cada grupo, as instâncias foram definidas com o intuito de realizar o planejamento da logística reversa no estado do Espírito Santo. No Grupo 2 a demanda de cada cliente foi acrescida de 50% em relação ao Grupo 1, prevendo um aumento em demandas futuras e como a indústria recicladora de pneus iria suprir isso.

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros das instâncias, sendo que coluna 'Inst.' representa o indicador único de cada uma das 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, sendo elas 'Tipo veículo' e 'Qtd. Veículos', que 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 - Definição das instâncias do problema

(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	3840	9	6	97	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
2	4800	9	8	97	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
3	5760	9	10	97	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
4	6720	9	12	94	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
5	7680	9	14	91	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
6	8640	9	20	91	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
7	8640	9	30	100	1	4	2	10
					2	3	3	7
					3	1	4	5
					4	1		
8	5760	9	6	97	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
9	7680	9	8	91	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
10	8640	9	10	97	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		
11	9600	9	12	99	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1	4	7
					4	1		

Tabela 2 - Definição das instâncias do problema

(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)
12	10560	9	14	99	1	4	2	7
					2	3	3	7
					3	1		
					4	1	4	7
13	12480	9	20	94	1	5	2	7
					2	3	3	7
					3	1		
					4	1	4	7
14	13440	9	30	96	1	4	2	10
					2	3	3	7
					3	1	4	5

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. Com essa capacidade inicial, a oferta de pneus inservíveis dos clientes mais próximos da indústria atenderia a 97% de sua demanda, instância 1. As instâncias foram criadas pensando na oferta diária de pneus inservíveis para os 26 municípios do Espírito Santo que foram considerados na análise, porém, como podemos ver na Tabela 2, a indústria com a sua capacidade de reciclagem atual não conseguiria suprir toda a oferta de pneus inservíveis dos 26 municípios do estado que foram considerados na análise, conseguindo atender apenas a oferta dos clientes contidos na instância 1 que são os clientes com maior geração de pneus inservíveis por dia.

O valor da capacidade do depósito para a instância 2 em diante sofreram incrementos, uma vez que os clientes contidos na instância 1 já supriram 97% da demanda da empresa recicladora com suas ofertas de pneus inservíveis, e, como as próximas instâncias têm uma maior quantidade de clientes, o que levou a necessidade desses incrementos. Sendo assim para a Instância 1, o valor da capacidade do depósito é a capacidade real da empresa recicladora de pneus, ou seja, 3840 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 e 8 consideram um incremento de 50% na capacidade real do depósito; para a Instância 4, a capacidade do depósito representa o valor da capacidade real do depósito acrescida de 75%; as

Instâncias 5 e 9 consideram que o valor da capacidade real do depósito foi dobrada, para as instâncias 6, 7 e 10, o valor da capacidade do depósito considera um incremento de 125% na capacidade real da empresa recicladora, para a Instância 11, a capacidade do depósito representa o valor da capacidade real do depósito com um acréscimo de 150%, e para as instâncias 12, 13 e 14, a capacidade do depósito para cada uma dessas instâncias representa o valor da capacidade real do depósito acrescido de 175%, 225% e 250%, respectivamente.

Foram feitas variações no número de clientes de acordo com o incremento da capacidade do depósito, já que uma capacidade maior de reciclagem de pneus possibilita atender um maior número de clientes, utilizou-se ao todo 30 clientes localizados em 26 municípios do Espírito Santo, sendo que para os municípios de Vila Velha, Vitória, Serra e Cariacica considerou-se que haverá dois clientes distintos em cada uma destes municípios. A escolha da localização dos satélites foi feita de acordo com a localização dos pontos de coleta de pneus inservíveis contidos no Espírito Santo conforme os dados da RECICLANIP, 2017. Para todas as instâncias utilizou-se a quantidade máxima de satélites existentes, uma vez que estes postos já existem conforme os dados da RECICLANIP, 2017 e não se tem a necessidade de verificar qual a melhor localização e custo para os satélites.

A quantidade de veículos foi definida de acordo com a demanda dos clientes de cada instância, visando a viabilidade do problema. As instâncias de 1 a 7 consideram uma projeção real da demanda dos clientes e as instâncias de 8 a 14 consideram que a demanda real terá um acréscimo de 50%, futuras variações que podem ocorrer com a demanda, estas instâncias foram criadas com o intuito de verificar como o modelo matemático se comportaria com a realidade da indústria e a de seus clientes.

Os satélites e clientes considerados para cada instância foram:

- Instâncias 1 e 8:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1 e Serra 2;

- Instância 2 e 9:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2 Cariacica 1 e Cariacica 2;
  
- Instância 3 e 10:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2 Cariacica 1, Cariacica 2, Cachoeiro de Itapemirim e São Mateus;
  
- Instância 4 e 11:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2 Cariacica 1, Cariacica 2, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina e Guarapari;
  
- Instância 5 e 12:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2 Cariacica 1, Cariacica 2, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Guarapari, Aracruz e Linhares;
  
- Instância 6 e 13:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2 Cariacica 1, Cariacica 2, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Guarapari, Aracruz, Linhares, Santa Maria de Jetibá, Castelo,

Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de São Francisco e Marataízes;

- Instância 7 e 14:
  - Satélites: Vila Velha, Serra, Vitória, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Cariacica, Linhares e Guarapari;
  - Clientes: Vila Velha 1, Vila Velha 2, Vitória 1, Vitória 2, Serra 1, Serra 2, Cariacica 1, Cariacica 2, Cachoeiro de Itapemirim, São Mateus, Colatina, Guarapari, Aracruz, Linhares, Santa Maria de Jetibá, Castelo, Nova Venécia, Domingos Martins, Barra de São Francisco, Marataízes, Viana, Iúna, São Gabriel da Palha, Conceição da Barra, Alegre, Ecoporanga, Muqui, Venda Nova do Imigrante, Itaguaçu e Bom Jesus do Itabapoana.

A elaboração das instâncias foi realizada de forma que todas elas respeitassem a Resolução nº 416/2009 do CONAMA que determina a implantação de um ponto de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios do Espírito Santo com mais de 100 mil habitantes, sendo assim segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) os municípios com número populacional maior que 100 mil habitantes são: Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica, Cachoeiro de Itapemirim, Linhares, Guarapari, Colatina e São Mateus. As seções a seguir apresentam 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 – 2016 (DENATRAN, 2016). 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. O valor de cada tipo de veículo foi somado em cada município e esse total foi dividido por 365, a fim de obter a quantidade diária de pneus inservíveis por município, os valores estimados de quantidade de pneu inservível gerado pelos municípios utilizados nas instâncias deste trabalho estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa do número de pneus inservíveis gerados diariamente em cada município do ES

<b>Município</b>	<b>Quantidade de pneu inservível por dia</b>
ALEGRE	69
ARACRUZ	251
BARRA DE SÃO FRANCISCO	115
BOM JESUS DO NORTE	66
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM	665
CARIACICA	928
CASTELO	151
COLATINA	353
CONCEIÇÃO DA BARRA	40
DOMINGOS MARTINS	138
ECOPORANGA	43
GUARAPARI	385
ITAGUAÇU	40
IUNA	80
LINHARES	420
MARATAIZES	123
MUQUI	37
NOVA VENECIA	136
SANTA MARIA DE JETIBA	193
SÃO GABRIEL DA PALHA	104
SÃO MATEUS	266
SERRA	1226
VENDA NOVA DO IMIGRANTE	108
VIANA	211
VILA VELHA	1269
VITÓRIA	1221
<b>TOTAL</b>	<b>8638</b>

## 5.2 MATRIZ DE DISTÂNCIA

Para se conseguir obter resultados reais na resolução das instâncias, os dados referentes à matriz de distância entre todas os municípios foram calculadas por meio do *Google Distance Matrix API* (Google Maps APIs, 2017), essa API foi acessada através de um macro codificado em VBA no Excel, que por meio da geolocalização (latitude e longitude) faz o cálculo da distância de uma geolocalização a outra, considerando um percurso factível, ou seja, considera a mão e a contramão das vias utilizadas no percurso. Esta API gera um percurso da mesma forma que o Google Maps gera, se houver dois caminhos distintos entre as geolocalizações a API retorna o valor com a menor distância, e, se houver mais de dois percursos entre as geolocalizações a API retorna a distância do caminho médio.

## 5.3 VEÍCULOS UTILIZADOS E CUSTOS DE TRANSPORTE

A capacidade da frota de veículos utilizados no 1º e no 2º nível foi definida conforme a capacidade real de veículos de carga, sendo assim neste trabalho utilizou-se de 4 tipos de veículos. Os veículos do tipo 1 representam os caminhões pesados com capacidade de 27,5 toneladas, os veículos do tipo 2 representam os caminhões semipesados com capacidades de 16,0 toneladas, os veículos do tipo 3 representam os caminhões médios com capacidade de 10,0 toneladas e por fim os veículos do tipo 4 representam os caminhões semi-leves com capacidade de 3,5 toneladas. A empresa de recicladora estima que a capacidade dos veículos em pneus será de 3.000, 1.800, 700 e 280 pneus para os veículos do tipo 1, 2, 3 e 4, respectivamente, sendo que para chegar a este valor considerou o valor de um pneu médio, os valores estão sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Capacidades dos veículos

<b>Veículo</b>	<b>Capacidade (ton)</b>	<b>Capacidade (pneus)</b>
Tipo 1	27,5	3.000
Tipo 2	16,0	1.800
Tipo 3	10,0	700
Tipo 4	3,5	280

O cálculo do custo variável de transporte de pneu por veículo foi realizado dividindo o custo variável de transporte por quilômetro rodado pela capacidade de pneus, para

cada tipo de veículo conforme a Tabela 5. O custo variável de transporte é a média dos custos com manutenção do veículo, como por exemplo: custos com pneus, câmaras e recapagens; combustível; óleos; lavagens e graxas.

Tabela 5 - Custo variável de transporte

<b>Veículo (tipo)</b>	<b>Custo do km rodado (R\$)</b>	<b>Capacidade (pneus)</b>	<b>Custo variável de transporte (R\$/km pneu)</b>
1	4,12	3.000	0,0014
2	2,06	1.800	0.0011
3	1,76	700	0,0025
4	1,24	280	0,0044

O custo fixo de transporte é calculado de acordo com a média que compreende depreciação, remuneração de capital, licenciamento, seguro obrigatório, IPVA, salário do motorista, encargos sociais e seguro do casco. Para este trabalho os dados de custos fixo e variável de transporte foram obtidos por meio do Portal Guia do TRC (2017a, b), Anuário NTC & Logística 2014/2015 (NTC, 2017) e Portal na Boleia (2017). Os valores para os custos fixos de transporte para os veículos utilizados no 1º e no 2º nível estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Custo fixo de transporte

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

Foi considerado que não é permitido circular com veículos do tipo 2 em municípios com menos de 100 mil habitantes, conforme o plano de mobilidade urbana do Espírito Santo, sendo assim os seguintes municípios tiveram restrição de acesso: Alegre, Aracruz, Barra de São Francisco, Bom Jesus do Norte, Castelo, Conceição da Barra, Domingos Martins, Ecoporanga, Itaguaçu, Iúna, Marataízes, Muqui, Nova Venécia, Santa Maria de Jetibá, São Gabriel da Palha, Venda Nova do Imigrante e Viana, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - População das cidades do Espírito Santo consideradas no estudo

<b>Município</b>	<b>Habitantes (un)</b>
ALEGRE	32.175
ARACRUZ	96.746
BARRA DE SÃO FRANCISCO	44.946
BOM JESUS DO NORTE	10.215
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM	210.325
CARIACICA	384.621
CASTELO	38.070
COLATINA	123.598
CONCEIÇÃO DA BARRA	31.353
DOMINGOS MARTINS	34.589
ECOPORANGA	24.243
GUARAPARI	121.506
ITAGUAÇU	14.822
IUNA	29.743
LINHARES	166.491
MARATAIZES	38.301
MUQUI	15.717
NOVA VENECIA	50.647
SANTA MARIA DE JETIBA	39.396
SÃO GABRIEL DA PALHA	36.858
SÃO MATEUS	126.437
SERRA	494.109
VENDA NOVA DO IMIGRANTE	24.165
VIANA	75.652
VILA VELHA	479.664
VITÓRIA	359.555

Fonte: IBGE (2017).

#### 5.4 CUSTO DE OPERAÇÃO

Ferri, Chaves e Ribeiro (2015) definem custo fixo de operação de acordo com os seguintes custos: salários e encargos de funcionários, manutenção do local e dos equipamentos, pintura, gastos de água, luz e telefone. Ferri, Chaves e Ribeiro (2015) consideram que um centro de armazém e triagem com capacidade de até 3.650 toneladas/ano terá um custo fixo de 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 recebendo um salário de R\$ 746,00/mês cada. Para o nosso trabalho iremos ajustar os valores conforme o aumento do salário mínimo de 2015 para 2017,

uma vez que em 2015 o salário mínimo era R\$ 788,00 e em 2017 o salário mínimo equivaleu a R\$ 937,00, temos que o aumento do salário mínimo entre esses anos foi de 18,91%, sendo assim, consideramos que um centro de armazém e triagem com capacidade de até 3.650 toneladas/ano terá os seguintes custos: R\$ 3.567,30/ano gastos com manutenção e pintura, R\$ 8.561,52/ano com energia, água, gás e telefone e a existência de 5 funcionários com um salário de R\$ 937,00/mês cada, consideramos aqui uma abordagem diferente da dos autores, uma vez que estamos considerando que os funcionários receberão um salário mínimo.

O site Calculador (2017) é uma ferramenta online que prove soluções de cálculos trabalhistas e umas delas é o cálculo de custo do funcionário para a empresa, portanto um funcionário com salário de R\$ 937,00 por mês custa ao empregador R\$ 1.432,57 devido aos encargos, a Tabela 8 apresenta esse cálculo. Considerando cinco funcionários, chega-se a um total de R\$ 7.162,85 por mês ou R\$ 85.954,20 por ano.

Tabela 8 - Custo de um funcionário

<b>Evento</b>	<b>Referência</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Salário	-	937,00
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	-	78,08
Provisão Férias	-	78,08
Provisão 1/3 Férias	-	26,03
FGTS	-	74,96
Provisão FGTS (13º e Férias)	-	14,58
INSS	20,00%	187,40
Provisão INSS (13º e Férias)	-	36,44
<b>Custo Funcionário</b>		<b>R\$ 1.432,57</b>

Fonte: Calculador (2017).

Assim, o custo de operação anual do centro de armazenagem é de R\$ 98.083,02 conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Custo anual de operação

<b>Tipo</b>	<b>Custo (R\$/ano)</b>
Salário de funcionários	85.954,20
Manutenção e pintura	3.567,30
Energia, água, gás e telefone	8.561,52
<b>Total</b>	<b>98.083,02</b>

Considerando que a capacidade do armazém é de 3650 toneladas, temos que o custo

operacional por tonelada é de R\$26,87.

Considerando-se, ainda, que um veículo com capacidade de 27,5 toneladas pode comportar 3.000 pneus, por proporção temos que 1 tonelada é equivalente a 109,09 pneus. Sendo assim, o custo operacional foi considerado de R\$0,25 por pneu.

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A execução das 14 instâncias, definidas no Capítulo 5, foi realizada utilizando o *solver* CPLEX 12.6 da IBM. Os resultados operacionais gerados por meio da execução dessas instâncias estão apresentados na Tabela 10, onde a coluna ‘Instância’ representa o número identificador das instâncias. A coluna ‘Satélites util.’ representa o número de satélites utilizados 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 última 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 utilizados neste nível em cada instância.

Tabela 10 - Resultados operacionais das instâncias

(continua)

Instância	Sat. util.	Número de veículos utilizados (un.)				Distância Percorrida (km)	
		1º nível		2º nível		1º nível	2º nível
		Tipo	Qtd.	Tipo	Qtd.		
1	3	1	1	2	3	96,606	76,875
		2	1				
2	3	1	1	2	3	96,606	109,642
		2	1				
3	3	1	2	2	2	107,694	761,211
				3	1		
4	4	1	1	2	4	149,525	891,91
		2	2				
5	4	1	2	2	4	154,356	1025,456
		2	1				
6	5	1	1	2	4	620,885	2857,712
		2	3				
7	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s
8	6	1	2	2	6	594,729	712,559
9	6	1	2	2	6	638,244	742,937
		2	1				

Tabela 10 - Resultados operacionais das instâncias

(continuação e conclusão)

Instância	Sat. util.	Número de veículos utilizados (un.)				Distância Percorrida (km)	
		1º nível		2º nível		1º nível	2º nível
		Tipo	Qtd.	Tipo	Qtd.		
10	7	1	3	2	7	906,647	760,128
11	7	1	2	2	7	954,326	1113,35
		2	2				
12	7	1	3	2	7	936,083	1517,276
		2	1	3	1		
13	7	1	4	2	7	962,132	2677,257
				3	3		
14	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s	s/s

\* s/s = sem solução factível encontrada pelo solver CPLEX.

De acordo com os resultados operacionais obtidos com a execução das instâncias por meio do *solver* CPLEX apresentado na Tabela 10, a distância percorrida no 2º nível cresce conforme a quantidade de clientes aumenta, o que é esperado, pois quanto maior for o número de clientes, maior será a distância percorrida. Estas duas variáveis são diretamente proporcionais. Os gráficos apresentados na Figura 7 e na Figura 8 ilustram estas duas variáveis. A Tabela 10 também mostra que em nenhuma das instâncias foram utilizados todos os satélites disponíveis como centro de consolidação de pneus. Nas instâncias de 1 a 7, o primeiro grupo, foram utilizados entre 3 a 5 satélites e, para as instâncias de 8 a 14, segundo grupo, foram utilizados entre 6 a 8 satélites.

Figura 7 - Distância percorrida no 2º nível para as instâncias

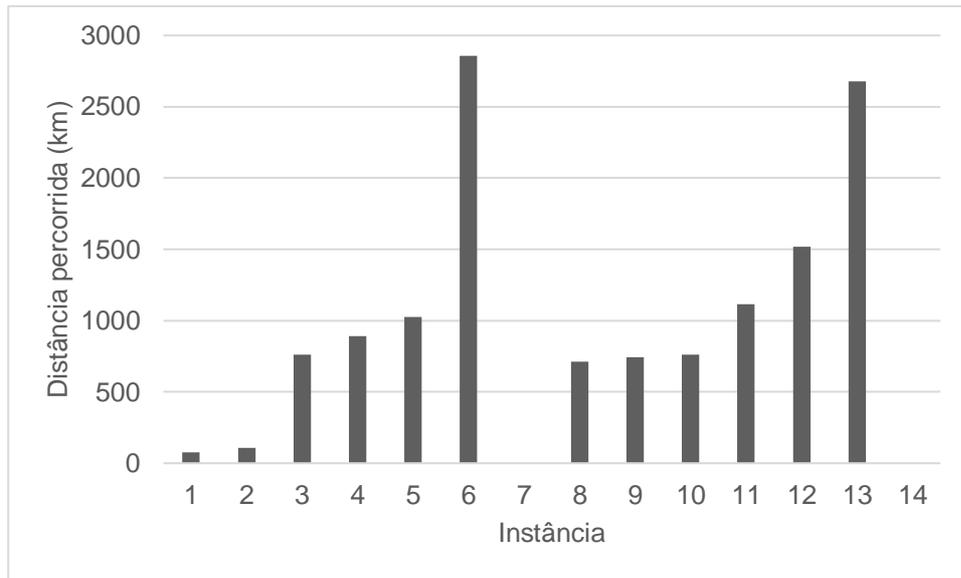
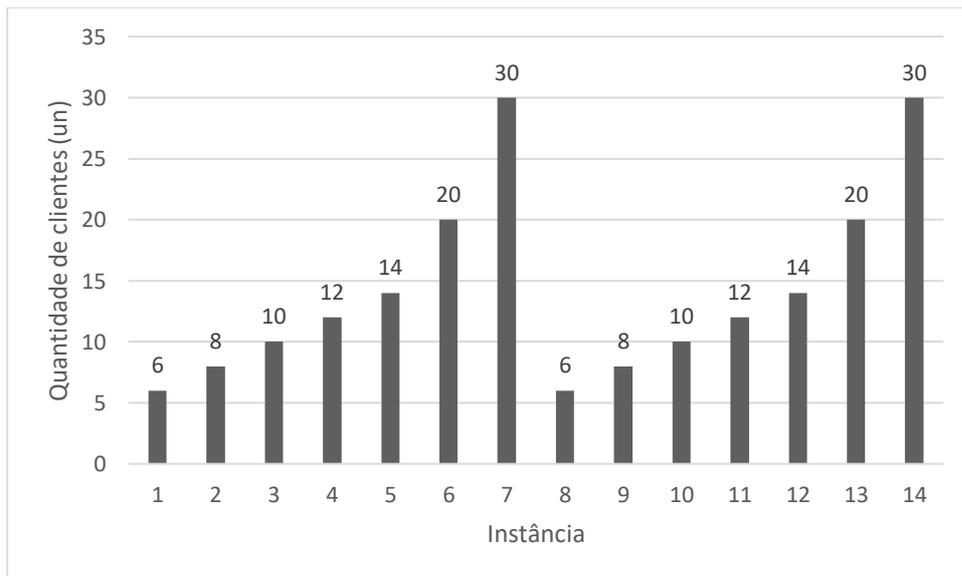


Figura 8 - Quantidade de clientes atendidos nas instâncias



Em relação a utilização de veículos, a Tabela 11 apresenta a porcentagem de utilização de veículos utilizados no 1º e no 2º nível, respectivamente. O cálculo dessa porcentagem foi realizado dividindo a quantidade de veículos utilizados para solucionar cada instância pela quantidade de veículos disponíveis para cada instância, de acordo com o tipo de veículo. Na Tabela 11 temos que a coluna “Instância” representa o número identificador de cada instância analisada; a coluna “1º nível” é dividida em “Tipo 1”, “Tipo 2”, “Tipo 3” e “Tipo 4” e para cada um desses tipos tem-se a porcentagem de veículos utilizados no 1º nível; a coluna “2º nível” é dividida em 3 colunas e apresenta a porcentagem dos veículos do 2º nível utilizados,

de acordo com o tipo de veículo, sendo que o tipo do veículo pode ser “Tipo 2”, “Tipo 3” ou “Tipo 4”.

Tabela 11 - Porcentagem dos veículos utilizados na resolução das instâncias

Instância	1º nível				2º nível		
	Tipo 1 (%)	Tipo 2 (%)	Tipo 3 (%)	Tipo 4 (%)	Tipo 2 (%)	Tipo 3 (%)	Tipo 4 (%)
1	0,25	0,33	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00
2	0,25	0,33	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00
3	0,50	0,00	0,00	0,00	0,29	0,14	0,00
4	0,25	0,67	0,00	0,00	0,57	0,00	0,00
5	0,50	0,33	0,00	0,00	0,57	0,00	0,14
6	0,25	1,00	0,00	0,00	0,57	0,29	0,29
7	s/s						
8	0,50	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00
9	0,50	0,33	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00
10	0,75	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
11	0,50	0,67	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
12	0,75	0,33	0,00	0,00	1,00	0,14	0,00
13	0,80	0,00	0,00	0,00	1,00	0,43	0,00
14	s/s						
<b>Média</b>	<b>0,48</b>	<b>0,33</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,71</b>	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>

\* s/s = sem solução factível encontrada pelo *solver* CPLEX.

O valor de 100% na Tabela 11 indica que todos os veículos disponíveis deste tipo foram utilizados, e o valor 0,00% indica que nenhum veículo disponível daquele tipo foi utilizado. O “s/s” nas células dessa tabela representam que não foi gerado resultado para a instância, desta forma não tem como saber qual a porcentagem de veículos foi utilizada na solução.

Ao analisarmos a Tabela 11 pode-se observar que para realizar as rotas do 1º nível foi utilizado somente veículos do tipo 1 e do tipo 2, tendo uma maior média de utilização de veículos do tipo 1 comparado com a média de utilização de veículos do tipo 2. Já para realizar as rotas do 2º nível houve instâncias que utilizaram os 3 tipos de veículos disponíveis, porém na média geral a maior utilização foi de veículos do tipo 2 seguidos de veículos de tipo 3 e tipo 4, respectivamente.

Os resultados de performance obtidos com a execução das instâncias estão apresentados na Tabela 12, onde a coluna ‘Instância’ representa o número identificador das instâncias. A coluna ‘Função Objetivo’ representa o valor da solução

em reais. A coluna “*Upper Bound*” representa o limitante superior da solução encontrada para a instância. A coluna “*Lower Bound*” representa o limitante inferior da solução encontrada para a instância. A coluna ‘Tempo de execução’ representa o tempo de execução do CPLEX para alcançar a solução em cada caso. A última coluna, ‘Gap’, representa o GAP encontrado pelo CPLEX, o GAP é calculado da seguinte forma:  $GAP = 100 \times (UB - LB) / UB$ .

Tabela 11 - Resultados de performance das instâncias

Instância	Função Objetivo	<i>Upper Bound</i>	<i>Lower Bound</i>	Tempo de Execução (seg)	Gap (%)
1	s/s	R\$ 5.403,48	R\$ 4.602,22	21600	14,83
2	s/s	R\$ 6.331,52	R\$ 5.846,82	21600	7,66
3	s/s	R\$ 7.749,43	R\$ 6.655,61	21600	14,11
4	s/s	R\$ 8.601,32	R\$ 7.498,38	21600	12,82
5	s/s	R\$ 9.677,51	R\$ 8.423,78	21600	12,96
6	s/s	R\$ 11.665,08	R\$ 3.751,14	36000	67,84
7	s/s	s/s	s/s	84600	s/s
8	s/s	R\$ 8.698,53	R\$ 7.758,45	21600	10,81
9	s/s	R\$ 10.403,63	R\$ 9.093,76	21600	12,59
10	s/s	R\$ 12.501,64	R\$ 10.826,13	21600	13,4
11	s/s	R\$ 13.708,14	R\$ 11.584,51	21600	15,49
12	s/s	R\$ 15.179,77	R\$ 12.925,71	21600	14,85
13	s/s	R\$ 17.224,76	R\$ 12.681,36	36000	26,38
14	s/s	s/s	s/s	84600	s/s

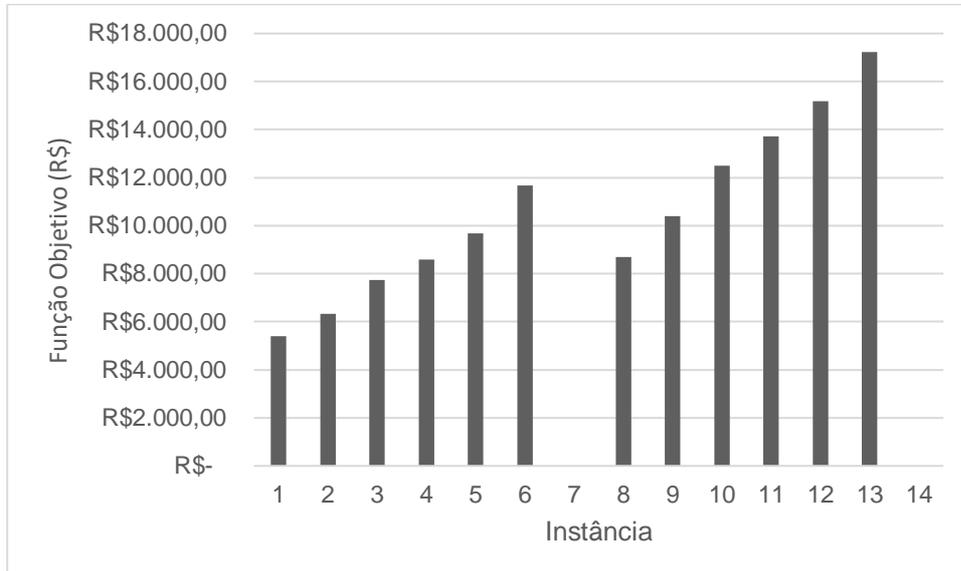
\* s/s = sem solução factível encontrada pelo *solver* CPLEX.

Os resultados de performance obtidos com a execução das 14 instâncias mostram que após 6 horas de execução do modelo, para as instâncias de 1 a 5 e de 8 a 12, o *solver* CPLEX ainda não havia convergido para a solução ótima. Já para as instâncias 6 e 13 este tempo foi de 10 horas. Assim, o GAP nas soluções encontradas foi de no mínimo 7,66% e no máximo 67,84% para estas instâncias. A Tabela 12 também evidencia que, para as maiores instâncias 7 e 14, o *solver* ainda não havia encontrado nenhuma solução após 1 dia de execução do modelo.

O gráfico da Figura 9 mostra que o valor da função objetivo cresce conforme aumenta a quantidade de cliente atendidos nas instâncias de 1 a 7, primeiro grupo, e nas

instâncias de 8 a 14, segundo grupo. O que é esperado uma vez que há um aumento do número de clientes de uma instância para outra.

Figura 9 - Função custo da logística reversa de pneus inservíveis para as instâncias



Os resultados comprovaram a complexidade do problema, uma vez que ao tentar solucionar instâncias que simulariam possíveis cenários reais utilizados pela empresa recicladora, não foi possível chegar a soluções ótimas em tempos aceitáveis. O problema de roteamento de veículos (PRV) é *NP-Hard* (CORDEAU *et al.* 2007), sendo assim todas as suas derivações são *NP-Hard*, inclusive o 2E-CVRP-HFSDTW. Ou seja, estes problemas são de grande complexidade e essa complexidade cresce exponencialmente à medida que se aumenta o número de variáveis. Desta forma surge a necessidade de se utilizar heurísticas e meta-heurísticas, que, dotadas de alguma inteligência artificial, seja ela probabilística ou imitando comportamentos da natureza, conseguem convergir para soluções boas em um intervalo de tempo aceitável.

## 6.1 ANÁLISE DA REDE LOGÍSTICA REVERSA

Nesta seção analisaremos as rotas utilizadas em algumas instâncias, exemplificando como seria realizada a logística reversa de pneus inservíveis no Espírito Santo. Para isto, plotou-se em mapas do Espírito Santo o roteamento resultante da resolução de 3 das 14 instâncias. As rotas de todas as instâncias encontram-se no APÊNDICE A

deste trabalho. Para realizar a confecção destes mapas considerou-se que a distância de dois pontos é igual a distância Euclidiana de dois pontos, pois não seria viável plotar o real trajeto utilizado nas rotas devido à sua grande complexidade, e também se considerou que a localização do cliente é diferente da localização do satélite nas cidades que possuem ambos cliente e satélite.

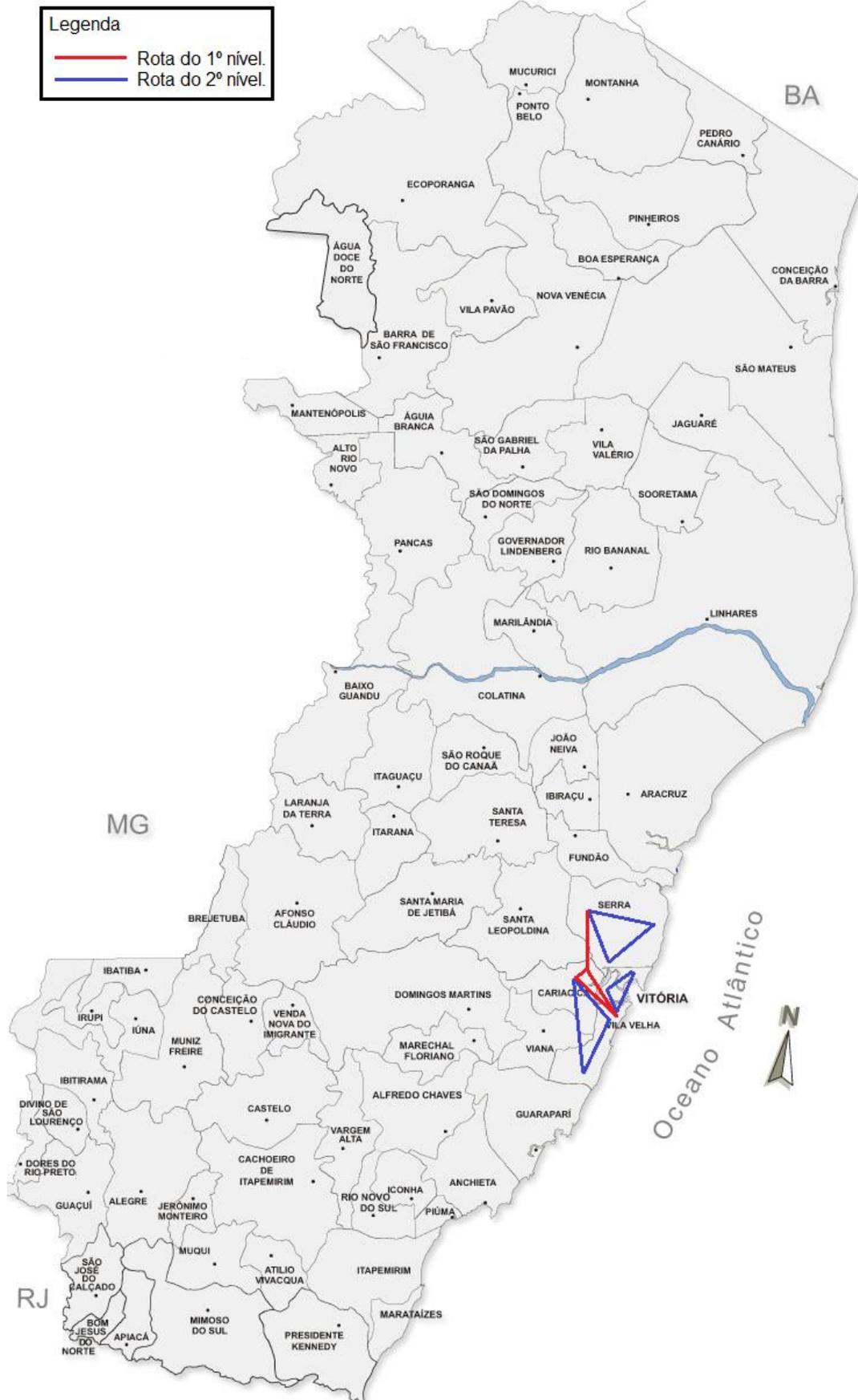
A Figura 10 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a solução gerada após 21600 segundos de execução da Instância 1. Essa instância representa a situação planejada para implantação da empresa recicladora, com uma capacidade de reciclagem de pneus que atenderia apenas 3 municípios geradores de pneus inservíveis, onde priorizaria o atendimento dos clientes com maior geração de pneus inservíveis por dia. No 1º nível são realizadas duas rotas, sendo que a primeira rota partiu da empresa recicladora passou pelo satélite situado em Vila Velha posteriormente pelo satélite situado em Cariacica e retornou a empresa recicladora; já a segunda rota partiu da empresa recicladora passou pelo satélite situado na Serra e retornou a empresa recicladora. No 2º nível, para o satélite situado em Vila Velha a rota foi feita com intuito de coletar os pneus das cidades de Vitória, através de uma única rota, saindo do satélite de Vila Velha passando pelos clientes de Vitória e retornando para o satélite de origem. Para o satélite situado na Serra a rota foi realizada para coletar os pneus inservíveis da cidade da Serra. E para o satélite situado em Cariacica com a rota realizada conseguiu-se coletar os pneus inservíveis da cidade de Vila Velha. Nessa instância, 97% da demanda da empresa recicladora é atendida com a oferta dos pneus inservíveis gerados pelos clientes contidos nessa instância, por dia.

A Figura 11 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a solução gerada após 21600 segundos de execução da Instância 3. Nessa instância, a empresa recicladora apresenta um incremento de 50% em sua capacidade de reciclagem, 97% da demanda da empresa recicladora é atendida com a oferta dos pneus inservíveis gerados pelos clientes contidos nessa instância, por dia. No 1º nível são realizadas duas rotas: a primeira partindo da empresa recicladora para o satélite situado em Vila Velha passando pelo satélite situado em Vitória e finalizando a rota novamente na empresa recicladora; e a segunda rota partindo da empresa recicladora e passando pelos satélites situados em Vila Velha e em Cariacica, nesta ordem, retornando para a empresa recicladora. No roteamento do 2º nível, há duas rotas que partem do satélite

situado em Vila Velha, a primeira recolhendo os pneus dos clientes de Vitória e Cariacica e a segunda recolhendo os pneus de um dos clientes de Vila Velha. No roteamento realizado para o satélite situado em Cariacica a rota foi feita para recolher os pneus dos clientes de Cachoeiro de Itapemirim, Cariacica e Vila Velha. Por fim, para o satélite situado em Vitoria é realizado a rota com a finalidade de recolher os pneus dos dois clientes da Serra e do cliente de São Mateus.

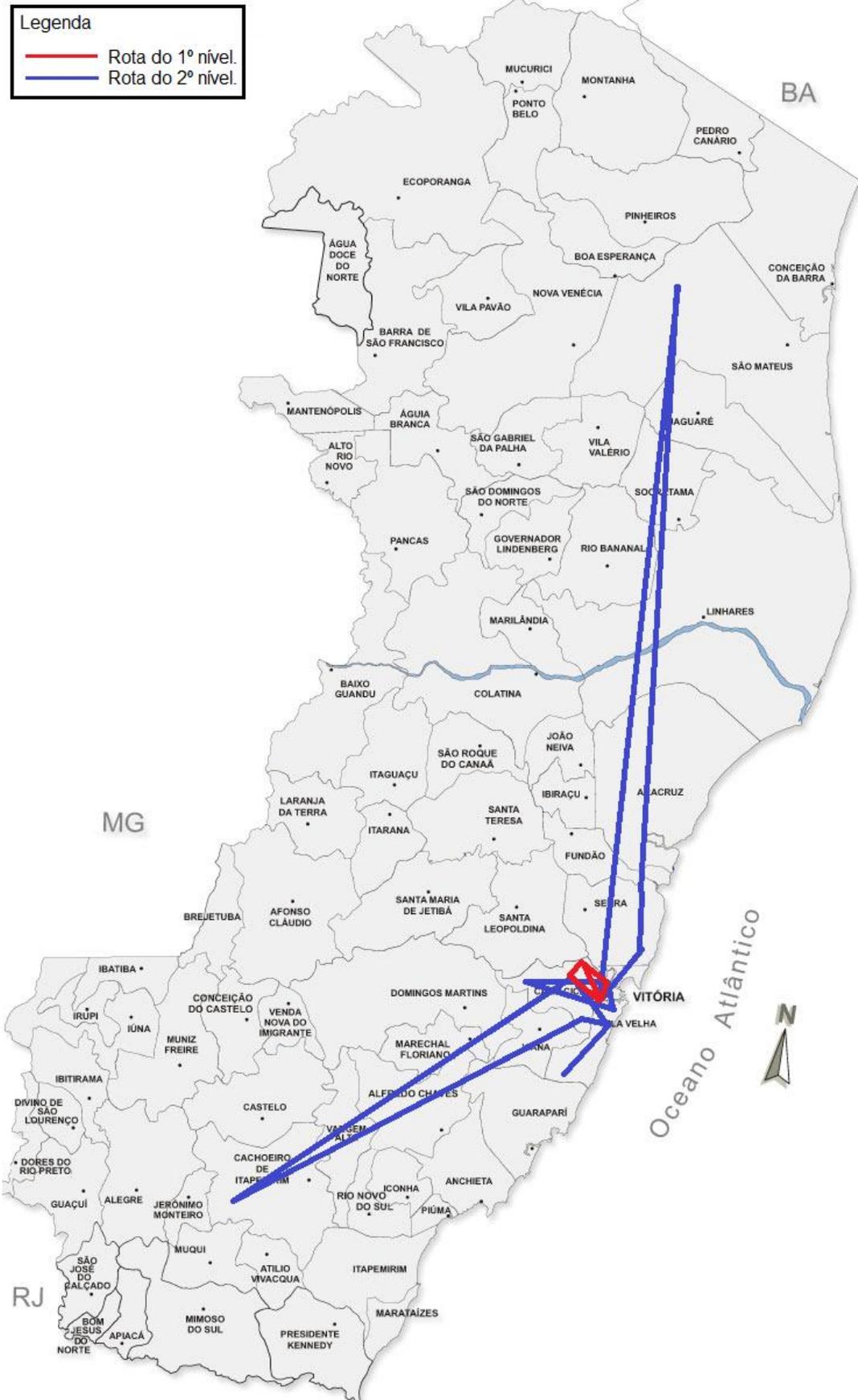
Por fim, a Figura 12 apresenta o roteamento em dois níveis proposto com a solução gerada após 36000 segundos de execução da Instância 6. Nessa instância, a empresa recicladora apresenta um incremento de 125% na sua capacidade de reciclagem inicial e 91% da demanda da empresa recicladora é atendida com a oferta dos pneus inservíveis gerados pelos clientes contidos nessa instância, por dia. Para o 1º nível, foi realizado três rotas, a primeira rota partiu da empresa recicladora passou pelos os satélites situados em Vila Velha, São Mateus e Linhares e a rota foi finalizada no depósito de origem; a segunda rota partiu da empresa recicladora passou pelo satélite de Vitória e retornando a empresa recicladora; a terceira rota começou na empresa recicladora passou pelos satélites situados em Vila Velha e Cariacica e terminou no depósito de origem; e por fim, a quarta rota teve início na empresa recicladora passando pelo satélite situado na Serra e a rota foi finalizada na empresa recicladora. Para o roteamento do 2º nível, foram realizadas três rotas para satélite situado em Vila Velha, a primeira atendendo os clientes de Guarapari, Cachoeiro de Itapemirim e um cliente de Vila Velha; a segunda rota atendendo os clientes de Domingos Martins e um cliente de Cariacica; e a terceira atendendo os clientes de Marataízes e Castelo. Para o satélite situado em São Mateus foi realizada duas rotas que partiram desse satélite e atendeu na primeira rota os clientes de Linhares, um cliente de Cariacica e um cliente de Vila Velha; e na segunda rota atendeu os clientes de Aracruz e Santa Maria de Jetibá. A rotas que partiram do satélite de Vitoria atendeu os clientes de Colatina, um de Vitória e um cliente da Serra. Para o satélite da Serra foi realizada uma rota atendendo os clientes de São Mateus, um cliente da Serra e um cliente de Vitória. Por fim, a rota feita para o satélite de Linhares atendeu os clientes de Nova Venécia e Barra de São Francisco.

Figura 10 - Roteamento da instância 1



Fonte: Adaptado de Brasil Turismo (2016); Fraga (2016)

Figura 11 - Roteamento da Instância 3



Fonte: Adaptado de Brasil Turismo (2016); Fraga (2016)



## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho de Conclusão de Curso propôs o modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence and Time Windows* para a logística reversa de pneus inservíveis estruturada em dois níveis. O desenvolvimento do modelo teve como base o modelo matemático 2E-CVRP-HFSD proposto por Fraga (2016) e diferencia-se deste por considerar a existência de frota heterogênea nos dois níveis, janela de tempo no 2º nível e restrição do limite de tempo máximo de viagem nos dois níveis do 2E-CVRP. Por ser uma variação completa do VRP o aumento das variáveis impactou na convergência do problema.

O modelo matemático proposto não conseguiu solucionar de forma ótima nenhuma das 14 instâncias que foram definidas no Capítulo 5, sendo que 12 dessas instâncias apresentaram GAP de no mínimo 7,66 e no máximo 67,84%, e as outras 2 instâncias (7 e 14) não apresentaram nenhuma solução após um dia de processamento utilizando o *solver* do CPLEX. Essas duas instâncias contemplam as maiores quantidades de clientes a serem atendidos pela indústria recicladora, abrangendo clientes localizados em 26 municípios do estado do Espírito Santo. Se atendidos, esses clientes teriam seus pneus inservíveis coletados e gerariam insumo para a empresa recicladora.

O modelo proposto pode ser utilizado pela empresa recicladora para realizar o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis como uma metodologia de planejamento logístico. Essa metodologia é uma ferramenta muito útil e substitui os métodos empíricos na determinação das rotas, provendo uma solução próxima da ótima, com GAP. Além disso, vale destacar que há possibilidade de convergência da solução caso o tempo de execução não seja um problema.

Existem outros problemas aos quais o modelo matemático proposto neste trabalho é capaz de solucionar, problemas que são solucionados por meio do planejamento da logística em dois níveis. Dentre os problemas possíveis temos: a logística de distribuição de encomendas utilizada pelos correios; a logística de distribuição de transportadoras em geral; e, a logística de roteamento para pontos turísticos em cidades turísticas.

Devido ao problema tratado neste trabalho ser NP-*Hard*, o *solver* CPLEX não foi capaz de solucionar de forma ótima as instâncias, pois, sendo um *solver*, o *software* testa todas as combinações possíveis para poder garantir a ótima. Dito isto, recomenda-se como sugestão para trabalhos futuros o uso de heurísticas e meta-heurísticas que utilizem inteligência artificial, seja utilizando métodos probabilísticos, que imitem o comportamento da natureza ou métodos que combinem ambos os métodos anteriores, afim de convergir para soluções muito próximas da ótima em um intervalo de tempo aceitável.

## REFERÊNCIAS

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](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 15 mai. 2017.

Brasil Turismo. Disponível em <<http://www.brasil-turismo.com/espirito-santo/mapas/mapa-politico.htm>>. Acesso em 20 jun. 2017.

BREUNIG, U.; SCHMID, V.; HARTL, R. F; VIDAL, T. A fast large neighbourhood based heuristic for the two-echelon vehicle routing problem. **Computers and Operation Research**, 76, p. 208–225, 2016.

Calculador. **Cálculo de custo de funcionário para empresa**. Disponível em: <<http://www.calculador.com.br/calculo/custo-funcionario-empresa>>. Acesso em: 01 jul. 2017.

CHRISTOFIDES, Nicos; EILON, Samuel. **An algorithm for the vehicle-dispatching problem**. *Or*, p. 309-318, 1969.

COELHO, L.C. Série Pesquisa Operacional – Problema de Roteamento de Veículos. Disponível em: <<http://www.logisticadescomplicada.com/serie-pesquisa-operacional-%E2%80%93-problema-de-roteamento-de-veiculos/>>. Acesso em: 09 de jul. 2017.

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.

CORDEAU, Jean-François et al. Vehicle routing. **Handbooks in operations research and management science**, v. 14, p. 367-428, 2007.

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, 2008a.

CRAINIC, T. G. et al. Lower bounds for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. In: **EU/Meeting, France**. 2008b.

CRAINIC, T.G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G.; TADEI, R. Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. **CIRRELT**, 30, 2010a.

CRAINIC, Teodor Gabriel et al. Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 2, n. 3, p. 5944-5955, 2010b.

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.

DELLAERT, N.; SARIDARQ, F. D.; WOENSEL, T. V.; CRAINIC, T. G. Branch & Price Based Algorithms for the Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Time Windows. **CIRRELT**, 45, 2016.

DENATRAN, Departamento Nacional de Trânsito. **Frota de Veículos - 2016**. Disponível em: < <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>>. Acesso em 15 mai. 2017.

ESMAILI, M.; SAHRAEIAN, R. A new Bi-objective model for a Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem for Perishable Products with the Environmental Factor. **IJE Transactions**, 30, p. 523-531, 2017.

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.

FRAGA, K. **Modelo matemático para planejamento da logística reversa de pneus inservíveis com base no modelo *Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem***. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2016.

FRAGMAQ. **Descarte de pneus**. 2012. Disponível em: <http://www.fragmaq.com.br/blog/reciclagem-residuos-solidos/descarte-de-pneus/>. Acesso em: 05 jul. 2017.

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

Google Maps APIs - **Distance Matrix API**. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/?hl=pt-br>> Acesso em: 05 jul. 2017.

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. **European Journal of Operational Research**, 50, p. 80-91, 2016.

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 jun. 2017.

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.

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

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.

NTC, Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. **Anuário NTC & Logística**. Disponível em: <<http://www.portalcntc.org.br/media/images/publicacoes/anoario-2014-2015/files/assets/common/downloads/page0062.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

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: Models and Math-Based Heuristics. **Transportation Science**, 45, n. 3, p. 364-380, 2011.

Portal Guia do TRC. **Planilha de custos operacionais de caminhões semi-pesados**. Disponível em: <[www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes\\_semip.xls](http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes_semip.xls)>. Acesso em: 15 jan. 2017.

Portal Guia do TRC. **Planilha de custos operacionais de caminhões pesados**. Disponível em: <[www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes\\_pesados.xls](http://www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhoes_pesados.xls)>. Acesso em: 15 jan. 2017.

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 jan. 2017.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Associação Pró-Ensino Superior em Novo Hamburgo - ASPEUR, 2013.

RECICLANIP. **Pontos de coleta no Brasil**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/pontos-coleta/brasil>> Acesso em: 01 jul. 2017.

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.

SONG, L., GU, H.; HUANG, H. A lower bound for the adaptive two-echelon capacitated vehicle routing problem. **Springer Science + Business Media New York**, 33, p. 1145-1167, 2017.

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**, 164, p. 366-378, 2015.

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: 20 jul. 2017.

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.

WANG, K; LAN, S.; ZHAO, Y. A genetic-algorithm-based approach to the two-echelon capacitated vehicle routing problem with stochastic demands in logistics service. **Journal of the Operational Research Society**, 2017.

## APÊNDICE A – Rotas encontradas em cada instância

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

- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Instância 4:
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 3 (Vitória) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 7 (Cariacica) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 12 (Guarapari) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 7 (Cariacica) > Cliente 6 (Serra) > Satélite 2 (Serra)
  - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 5 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Cliente 10 (São Mateus) > Satélite 3 (Vitória)
  - Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 1 (Vitória) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica)
- Instância 5:
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 3 (Vitória) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 12 (Guarapari) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Cliente 14 (Linhares) > Cliente 10 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra)
  - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 6 (Serra) > Cliente 7 (Cariacica) > Cliente 1 (Vitória) > Satélite 3 (Vitória)
  - Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica)
  - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 13 (Aracruz) > Satélite 3 (Vitória)
- Instância 6:
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 5 (São Mateus)

- > Satélite 8 (Linhares) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 3 (Vitória) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica) > Depósito (Cariacica)
  - Depósito (Cariacica) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 12 (Guarapari) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 5 (Serra) > Cliente 1 (Vitória) > Cliente 10 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra)
  - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 6 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 3 (Vitória)
  - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 14 (Linhares) > Cliente 7 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 5 (São Mateus)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 18 (Domingos Martins) > Cliente 8 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 13 (Aracruz) > Cliente 15 (Santa Maria de Jetibá) > Satélite 5 (São Mateus)
  - Satélite 8 (Linhares) > Cliente 17 (Nova Venécia) > Cliente 19 (Barra de São Francisco) > Satélite 8 (Linhares)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 20 (Marataízes) > Cliente 16 (Castelo) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Instância 7:
    - Não foi encontrado solução para esta instância.
  - Instância 8:
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 6 (Colatina) > Satélite 5 (São Mateus) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 7 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 3 (Vitória) > Depósito (Cariacica)
    - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
    - Satélite 2 (Serra) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 2 (Serra)
    - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 1 (Vitória) > Satélite 3 (Vitória)
    - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 5 (Serra) > Satélite 5 (São Mateus)

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

6 (Colatina)

- Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica)

- Instância 11:

- Depósito (Cariacica) > Satélite 3 (Vitória) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
- Depósito (Cariacica) > Satélite 6 (Colatina) > Satélite 5 (São Mateus) > Depósito (Cariacica)
- Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica) > Depósito (Cariacica)
- Depósito (Cariacica) > Satélite 7 (Cariacica) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Depósito (Cariacica)
- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Vila Velha) > Satélite 1 (Vila Velha)
- Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
- Satélite 3 (Vitória) > Cliente 2 (Vitória) > Cliente 12 (Guarapari) > Satélite 3 (Vitória)
- Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim)
- Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 10 (São Mateus) > Cliente 5 (Serra) > Satélite 5 (São Mateus)
- Satélite 6 (Colatina) > Cliente 7 (Cariacica) > Cliente 1 (Vitória) > Satélite 6 (Colatina)
- Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica)

- Instâncias 12:

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

- Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 4 (Vila Velha) > Cliente 10 (São Mateus) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 2 (Serra)
  - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 1 (Vitória) > Satélite 3 (Vitória)
  - Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 12 (Guarapari) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim)
  - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 14 (Linhares) > Cliente 5 (Serra) > Satélite 5 (São Mateus)
  - Satélite 6 (Colatina) > Cliente 6 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Satélite 6 (Colatina)
  - Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 7 (Cariacica) > Cliente 3 (Vila Velha) > Satélite 7 (Cariacica)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 13 (Aracruz) > Satélite 2 (Serra)
- Instância 13:
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 7 (Cariacica) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Depósito (Cariacica)
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha) > Satélite 3 (Vitória) > Depósito (Cariacica)
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 3 (Vitória) > Satélite 2 (Serra) > Depósito (Cariacica)
    - Depósito (Cariacica) > Satélite 6 (Colatina) > Satélite 5 (São Mateus) > Depósito (Cariacica)
    - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 3 (Vila Velha) > Cliente 7 (Cariacica) > Satélite 1 (Vila Velha)
    - Satélite 2 (Serra) > Cliente 6 (Serra) > Cliente 11 (Colatina) > Satélite 2 (Serra)
    - Satélite 3 (Vitória) > Cliente 8 (Cariacica) > Cliente 1 (Vitória) > Satélite 3 (Vitória)
    - Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 9 (Cachoeiro de Itapemirim) > Cliente 12 (Guarapari) > Satélite 4 (Cachoeiro de Itapemirim)
    - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 14 (Linhares) > Cliente 2 (Vitória) > Satélite 5 (São Mateus)

- Satélite 6 (Colatina) > Cliente 5 (Serra) > Satélite 6 (Colatina)
  - Satélite 7 (Cariacica) > Cliente 4 (Vila Velha) > Cliente 10 (São Mateus) > Satélite 7 (Cariacica)
  - Satélite 1 (Vila Velha) > Cliente 18 (Domingos Martins) > Cliente 20 (Marataízes) > Cliente 16 (Castelo) > Satélite 1 (Vila Velha)
  - Satélite 2 (Serra) > Cliente 13 (Aracruz) > Cliente 15 (Santa Maria de Jetibá) > Satélite 2 (Serra)
  - Satélite 5 (São Mateus) > Cliente 19 (Barra de São Francisco) > Cliente 17 (Nova Venécia) > Satélite 5 (São Mateus)
- Instância 14:
    - Não foi encontrado solução para esta instância.