

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

AMÁBILE CUCCO DE CARLI

**PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS NO CONTEXTO DA
LOGÍSTICA URBANA CONSIDERANDO A INTEGRAÇÃO DO TRANSPORTE
AQUAVIÁRIO COM O TERRESTRE**

VITÓRIA
2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

D278p De Carli, Amábile Cucco, 1992-
Planejamento da distribuição de cargas no contexto da logística urbana considerando a integração do transporte aquaviário com o terrestre / Amábile Cucco De Carli. - 2022.
67 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Logística. 2. Transporte urbano. 3. Pesquisa Operacional. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AMÁBILE CUCCO DE CARLI

**PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS NO CONTEXTO DA
LOGÍSTICA URBANA CONSIDERANDO A INTEGRAÇÃO DO TRANSPORTE
AQUAVIÁRIO COM O TERRESTRE**

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS NO CONTEXTO DA
LOGÍSTICA URBANA CONSIDERANDO A INTEGRAÇÃO DO TRANSPORTE
AQUAVIÁRIO COM O TERRESTRE**

Amábile Cucco De Carli

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

Aprovada no dia ___ de _____ por:

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

Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologias Espaciais
Examinador interno - UFES

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Doutor em Computação Aplicada
Examinador externo - UFES

Vitória – ES, _____ de 2022

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste estudo, em especial meu esposo João Detone e meu filho João Lorenzo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar o dom da vida e a minha família por me apoiar neste momento de muita dedicação.

Ao meu esposo João Luis Detone Junior, que mesmo nas situações adversas, me encheu de motivação. Ao meu filho João Lorenzo, que foi minha companhia no período de aulas à distância, deu tudo certo! Sou grata a meus pais João Otavio e Rosimar por me incentivarem a estudar e me tornar mestra. Aos meus sogros Ana e João por não medirem esforços para me ajudar.

Ao meu orientador Rodrigo de Alvarenga Rosa, que depositou confiança e teve a maestria de conduzir este trabalho. Cada hora de dedicação e reuniões, transformaram nossa relação em uma amizade incrível! Com conselhos profissionais e pessoais, pude concluir este trabalho com muita alegria.

À FAPES pelo apoio financeiro e por facilitar o acesso à literatura através do portal de periódicos.

Aos amigos Bruna, Ciro e Natan por serem os parceiros de curso mais presentes, mesmo em um período de pandemia, o qual tivemos pouquíssimo contato pessoal. Obrigado a turma do LAMMEP pela amizade e cooperação.

Valeu a pena!

RESUMO

As empresas de varejo têm buscado novas alternativas de transporte para a entrega de cargas dentro das cidades visando reduzir seus custos de transporte. No contexto de cidades que possuem ligações aquaviárias, marítimas ou fluviais, a integração do transporte aquaviário com o terrestre é uma alternativa interessante, visto que restrições de acesso à caminhões tem se tornado cada vez mais presentes nos centros urbanos. Assim sendo, esta dissertação propõe uma estratégia integrada de distribuição de carga combinando o transporte aquaviário com o terrestre. É considerada a utilização da infraestrutura dos Terminais Aquaviários (TAs) públicos de passageiros para receberem também embarcações de cargas e em paralelo gerar receita alternativa para o Estado. Foram escolhidos para testar o modelo proposto dados dos municípios de Vitória, Cariacica e Vila Velha, visto que governo do Estado do Espírito Santo (ES) está implantando um sistema de transporte aquaviário de passageiros entre esses três municípios. Para planejar de forma integrada os dois transportes, criou-se um modelo matemático inspirado no *Two-echelon Capacitated Routing Problem* (2E-CVRP) sendo considerada distribuição em duas etapas, múltiplas viagens, janela de tempo e restrição de acesso. A primeira etapa se refere ao transporte aquaviário, o qual contempla embarcações que viajam entre Centro de Consolidação de Carga (CCC) e TAs. Já a segunda etapa, que é realizada por veículos terrestres, tais como bicicletas e motocicletas, diz respeito ao trajeto entre os TAs e os clientes finais. Para resolver o modelo, utilizou-se o CPLEX 12.20 e os resultados indicaram que a utilização dos TAs é uma estratégia funcional e apresenta melhores resultados quando integrado à frota terrestre de bicicletas com múltiplas viagens. Além disso, verificou-se que ter maior quantidade de pontos para atracação das embarcações, ou seja, maior disponibilidade de TAs, diminuiu em até 6% o custo de transporte.

Palavras-chave: Logística urbana. Transporte aquaviário. Multimodalidade. *Two-echelon Capacitated Routing Problem*.

ABSTRACT

Retail companies have been looking for new transport alternatives for delivering cargo within cities in order to reduce their transport costs. In the context of cities that have waterway, maritime, or river connections, the integration of waterway transport with land transport is an interesting alternative, since restrictions on access to trucks have become increasingly present in urban centers. Therefore, this dissertation proposes an integrated cargo distribution strategy combining waterway and land transport. The use of public passenger Waterway Terminal infrastructure is considered to also receive cargo ships and, in parallel, generate alternative revenue for the State. Data from the municipalities of Vitória, Cariacica, and Vila Velha were chosen to test the proposed model since the government of the State of Espírito Santo (ES) is implementing a waterway passenger transport system between these three municipalities. To plan the two types of transport in an integrated way, a mathematical model inspired by the Two-echelon Capacitated Routing Problem (2E-CVRP) was created, considering a two-step distribution, multiple trips, time window, and access restriction. The first stage refers to waterway transport, which includes ships traveling between the Cargo Consolidation Center (CCC) and Waterway Terminals. The second stage, which is carried out by land vehicles, such as bicycles and motorcycles, concerns the route between the Waterway Terminals and the final customers. To solve the model, CPLEX 12.20 was used and the results indicated that the use of Waterway Terminals is a functional strategy and presents better results when integrated with the terrestrial fleet of bicycles with multiple trips. In addition, it was found that having a greater number of points for berthing ships, that is, greater availability of more Waterway Terminals, reduced the transportation costs by up to 6%.

Keywords: City logistics. Waterway transportation. Multimodality. *Two-echelon Capacitated Routing Problem*.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sistema de transporte aquaviário (ES) | 12 |
| Figura 2 - Estrutura da dissertação | 15 |
| Figura 3 - Exemplo do roteamento 2E-CVRP | 17 |
| Figura 4 - Terminal Aquaviário (imagem 3D) | 25 |
| Figura 5 - Exemplos de embarcações para transporte de cargas via aquaviário | 26 |
| Figura 6 - Transporte de mercadorias via modo aquaviário integrado ao terrestre .. | 27 |
| Figura 7 - Localização do CCC e dos TAs | 28 |
| Figura 8 - Estratégia de integração do transporte aquaviário com o terrestre | 29 |
| Figura 9 - Esquema dos TAs e clientes (13 clientes)..... | 42 |
| Figura 10 - Transporte de carga via modo terrestre..... | 43 |
| Figura 11 - Esquema e gráfico geral | 49 |
| Figura 12 - Esquema e gráfico das viagens 1ª e 1B (Grupo 1)..... | 50 |
| Figura 13 - Gráfico dos custos do Grupo 1 | 50 |
| Figura 14 - Esquema das viagens da Instância 2A e 2F (Grupo 2)..... | 51 |
| Figura 15 - Esquema das viagens da Instância 2B e 2G (Grupo 2)..... | 52 |
| Figura 16 - Esquema das viagens da Instância 2D e 2E (Grupo 2)..... | 53 |
| Figura 17 - Gráfico de Custos de Transporte do Grupo 2..... | 53 |
| Figura 18 - Esquema das viagens da Instância 2H (Grupo 2) | 54 |
| Figura 19 - Gráfico dos custos do Grupo 3 | 55 |
| Figura 20 - Esquema das viagens da Instância 3A e 3B (Grupo 3)..... | 56 |
| Figura 21 - Esquema das viagens da Instância 3C, 3D, 3E e 3F (Grupo 3)..... | 57 |
| Figura 22 - Esquema das viagens da Instância 4A, 4B, 4C, 4D, 4E e 4F (Grupo 4) | 59 |
| Figura 23 - Gráfico dos custos do Grupo 4 | 60 |
| Figura 24 - Custo de frotas terrestres | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Denominação, localização e Classificação dos TAs..... | 28 |
| Tabela 2 - Matriz de distâncias entre TAs em quilômetros | 42 |
| Tabela 3 - Características das instâncias de teste..... | 44 |
| Tabela 4 - Instâncias de teste | 46 |
| Tabela 5 - Resultados do CPLEX para as instâncias dos grupos 1 a 3..... | 47 |
| Tabela 6 - Custos das Instâncias | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 OBJETIVOS | 14 |
| 1.1.1 Geral | 14 |
| 1.1.2 Específicos | 14 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 15 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 <i>TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM</i> | 16 |
| 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA | 25 |
| 4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO | 31 |
| 4.1 CONJUNTOS E PARÂMETROS | 31 |
| 4.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO | 33 |
| 4.3 FUNÇÃO OBJETIVO | 34 |
| 4.4 RESTRIÇÕES | 35 |
| 5 EXECUÇÃO DO MODELO | 40 |
| 5.1 INSTÂNCIAS DE TESTE | 41 |
| 5.2 RESULTADOS E ANÁLISES | 47 |
| 6 CONCLUSÕES | 62 |
| REFERÊNCIAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

Novas alternativas de transportes vêm sendo estudadas pelas empresas de comércio e varejo. Segundo a Câmara Brasileira de Comércio Eletrônico (2021), o e-commerce brasileiro cresceu 73,88% em 2020. O aumento de frotas rodoviárias realizando entregas, impactaram diariamente a qualidade da mobilidade nas cidades. Esta questão é multidimensional, pois envolve não só os fornecedores, estoques e clientes, mas também as conexões entre os modos de transportes, estacionamento de veículos e sucesso nas entregas. Com este crescimento considerável, cada vez tem-se utilizado de mais veículos para atender as demandas nos centros urbanos e, conseqüentemente, houve o aumento de congestionamentos, emissões de poluentes e sobrecarga de pontes pela elevada quantidade de caminhões que adentram os centros urbanos para realizar entregas.

No contexto de cidades que possuem ligações aquaviárias, marítimas e/ou fluviais, a integração do transporte aquaviário com o terrestre pode ser uma alternativa interessante para as empresas de distribuição de cargas no contexto da logística urbana. O transporte aquaviário é considerado o mais eficiente em termos de matriz energética e possui baixo custo de implantação, porém é pouco utilizado no Brasil. Ao analisar centros urbanos, mesmo subutilizado, o modo aquaviário atua mais comumente com o transporte de passageiros. O potencial do transporte de cargas nestes sistemas é igualmente promissor, e se torna algo que precisa ser explorado (IPEA, 2014).

De acordo com a Secretaria de Mobilidade e Infraestrutura do Espírito Santo – SEMOBI/ES, um sistema aquaviário de passageiros com quatro Terminais Aquaviários (TAs) está sendo implantado no canal de Vitória (SEMOBI, 2021). Uma nova estratégia de distribuição de cargas será estudada. Será utilizada a infraestrutura dos TAs públicos de passageiros para receberem embarcações marítimas de cargas de um operador logístico. A estratégia de distribuição proposta foi idealizada em duas etapas de transporte. A primeira etapa é composta por embarcações que viajam entre o Centro de Consolidação de Carga (CCC) e os Terminais Aquaviários (TAs). Já a segunda etapa é composta pelos veículos terrestres que realizam as entregas a partir dos TAs até o cliente final.

Na Figura 1 é possível identificar os TAs que farão parte do sistema integrado da Região Metropolitana da Grande Vitória, são eles: Porto Santana, Centro de Vitória, Praça do Papa e Prainha. O Centro de Consolidação de Cargas (CCC), se localiza na parte continental na cidade de Cariacica por se tratar de um local que possui bom acesso para seu abastecimento. Este, não possui restrições de acesso, podendo receber cargas durante o dia e a noite. Os demais TAs funcionarão como centro de distribuição e serão abastecidos pelas cargas consolidadas no CCC via o transporte aquaviário.

Figura 1 - Sistema de transporte aquaviário (ES)



Fonte: SEMOBI-ES (2021).

Segundo informações da Secretaria de Estado de Mobilidade e Infraestrutura (SEMOBI), o transporte aquaviário de passageiro é financeiramente deficiente, ou seja, a receita vinda do pagamento de passagem é menor do que seu custo operacional (A Gazeta, 2021). Assim, visando o equilíbrio financeiro do sistema aquaviário de passageiro, esta dissertação propõe oferecer uma nova receita advinda da cobrança pela utilização da infraestrutura dos TAs, ou seja, por atracação das embarcações de carga de terceiros.

Para planejar esta nova estratégia proposta, um modelo matemático foi desenvolvido para definir a quantidade de embarcações, a quantidade de veículos terrestres, as rotas das embarcações e veículos, e o número de atracções realizadas nos TAs que levem à minimização dos custos de transporte. O modelo matemático proposto foi inspirado no *Two-Echelon Capacited Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)*. O 2E-CVRP é o problema de roteamento conhecido na literatura que contempla dois níveis de distribuição e lida com os mais diversos cenários de integração de modos de transportes e frotas por apresentar pontos intermediários de distribuição ou recolhimento de carga. O 2E-CVRP possui complexidades e é um problema de otimização combinatória NP-hard (COELHO, 2017).

Esta abordagem é muito comum na logística urbana, que detém de estratégias e planejamento para reduzir custos globais de transporte (Crainic et al. 2004). Cotidianamente, os operadores logísticos necessitam minimizar os impactos de frotas de caminhões que adentram o perímetro urbano, visto que cada vez mais são impostas restrições de acesso e horários para realizarem suas operações. Portanto, soluções alternativas devem ser estudadas e utilizadas. A integração do transporte aquaviário ao terrestre para distribuição de cargas não foi encontrada em nenhum trabalho, e este presente estudo irá considerar uma abordagem mais completa, considerando janelas de tempo, restrições de acesso e múltiplas viagens.

O modelo é aplicado ao caso de cidades que possuem ligações aquaviárias para um operador logístico que deseja usufruir desta via alternativa. Os resultados indicaram que a utilização dos TAs é uma estratégia funcional e apresenta melhores resultados quando integrada às frotas de bicicletas que realizam múltiplas viagens na segunda etapa de transporte. Foram testados cenários de expansão do sistema, para comparar a influência da quantidade de terminais disponíveis para o roteamento. O modelo busca minimizar os custos relacionados ao número de embarcações e veículos necessários para atender a demanda, à distância percorrida e quantidade de atracções realizadas pelas embarcações.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Elaborar um modelo matemático que planeje as rotas de distribuição de cargas considerando a integração do transporte aquaviário com o terrestre, considerando a distribuição aquaviária sendo feita por embarcações e a distribuição terrestre feita por motocicletas e bicicletas, a fim de minimizar os custos de transporte e contribuir com a logística urbana.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Verificar se uma possível expansão na quantidade de TAs disponíveis para o roteamento impacta positivamente no desempenho do sistema integrado;
- b) Apresentar a melhor frota de embarcações e veículos terrestres para atender o sistema de distribuição de carga.

1.2 JUSTIFICATIVA

Restrições rodoviárias vêm sendo implementadas nos centros urbanos com mais frequência, a fim de diminuir o tráfego de veículos pesados nas ruas e avenidas. Uma metrópole que contém acessos aquaviários possui potencial para utilizar este transporte e contribuir para a logística urbana.

Deseja-se estudar a possibilidade de implementação de um sistema de distribuição de cargas aquaviário integrado ao transporte terrestre, onde haja o aproveitamento da infraestrutura de terminais de passageiros que serão implantados pelo Governo do estado do ES. A possibilidade de coexistir embarcações de passageiros e embarcações de cargas utilizando da mesma infraestrutura gera receita extra para o estado e viabiliza economicamente outro nicho de atuação de empresas do ramo logístico.

A mobilidade das cidades envolvidas será impactada positivamente com a diminuição das frotas rodoviárias orientadas para atender a demanda de entregas nos centros. A troca de caminhões por embarcações possibilita a diminuição das filas de congestionamentos e diminui a sobrecarga nas pontes que interligam os canais, rios e/ou lagos.

Até o momento não se conhece trabalhos que abordem de forma conjunta o problema de roteamento integrando o transporte aquaviário e terrestre para distribuição de cargas. Por se tratar de um procedimento experimental, o qual foi utilizado modelagem matemática e um *software* de otimização, foi possível propor cenários que seriam impossíveis de serem testados empiricamente. Por fim, a abordagem quantitativa que resultou em números, permitiu que análises gráficas colaborassem para a conclusão dos resultados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos e visa explorar o planejamento de uma nova estratégia de distribuição que utiliza o 2E-CVRP.

O Capítulo 1 é introdutório e apresenta a Introdução. Também descreve os objetivos, justificativas que este estudo abrange e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 traz um referencial teórico sobre os problemas de roteamento e carregamento em duas etapas, bem como uma revisão de literatura sobre o 2E-CVRP e suas variantes de interesse (frota heterogênea, janelas de tempo, múltiplas viagens e restrição de acesso), a fim de delimitar as lacunas de pesquisa e embasar o trabalho. Também apresenta o referencial do transporte aquaviário de carga para complementar o assunto estudado.

O Capítulo 3 descreve de forma detalhada o problema a ser estudado. O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto com os conjuntos, parâmetros, variáveis decisão, função objetivo e restrições.

O Capítulo 5 apresenta a execução do modelo, descreve as instâncias de teste do modelo e expõe os resultados obtidos e as análises realizadas. O Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras. A

Figura 2 ilustra a estrutura da dissertação e a sequência das etapas de estudo.

Figura 2 - Estrutura da dissertação



Fonte: a Autora.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está dividido em 2 subcapítulos. O subcapítulo 2.1 apresenta conceitos relativos a problemas de roteamento de veículos em geral, o problema clássico e suas principais variantes do transporte realizado em duas etapas e apresenta estudos que foram realizados sobre este mesmo assunto. O Subcapítulo 2.2 diz respeito ao transporte aquaviário e suas particularidades, bem como a integração a outros transportes.

2.1 TWO-ECHELON CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM

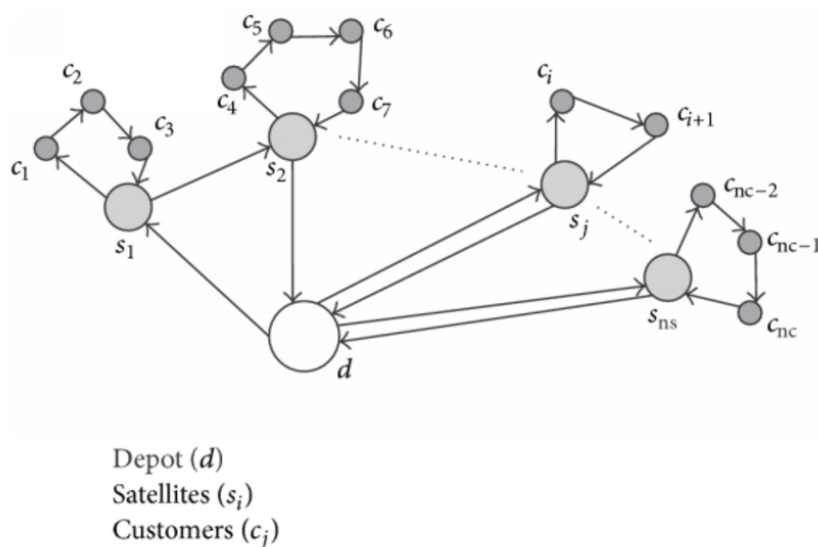
Diversos estudos foram realizados sobre a distribuição de cargas, utilizando veículos maiores até os centros de distribuição urbana e veículos menores para distribuição de cargas dentro das cidades. Serão apresentadas contribuições científicas de estudos que utilizaram o *Two Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP)* para solucionar problemas que se enquadram na distribuição em dois níveis. Neste capítulo será feita uma revisão da literatura sobre o 2E-CVRP e como este assunto vem sendo desenvolvido.

O *Vehicle Routing Problem (VRP)* é um problema de otimização combinatória, que busca solucionar e determinar as rotas ótimas de um conjunto de demandas provenientes dos clientes. O VRP é o mais simples dos sistemas no contexto de planejamento logístico e considera que os veículos partem de um depósito, atendem os clientes e retornam para o depósito originário. Ao limitar a capacidade dos veículos ou restringir o tempo de operação dos veículos, criou-se o *Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP* (Figura 3), uma variação do VRP (CRAINIC, 2012).

No problema de roteamento em dois níveis, conhecido como *Two Echelon Vehicle Routing Problem (2E-VRP)*, os veículos de maior porte atendem as rotas do 1º nível entre depósito central e depósitos intermediários (satélites) e no 2º nível os veículos menores finalizam a entrega até o cliente final. A variação mais básica do 2E-VRP é o *Two Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (PERBOLI et al., 2012)*. A primeira aplicação do 2E-CVRP foi introduzida por Jacobsen e Madsen (1980) e posteriormente, 20 anos depois, uma descrição formal do problema foi apresentada

por Crainic *et al.* (2004). Este problema de roteamento de veículos que vem atraindo crescente atenção na literatura devido à sua relevância em aplicações na vida real. 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 (CUDA *et al.*, 2015).

Figura 3 - Exemplo do roteamento 2E-CVRP



Fonte: PERBOLI, *et al.* (2008).

Vitorugo e Caliman (2017) elaboraram um estudo baseado no problema de roteamento 2E-CVRP. Diante do cenário de pneus inservíveis no estado do Espírito Santo, Brasil, as autoras apresentaram uma variação do 2E-CVRP, com a proposição do modelo matemático *Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet, Site Dependence with Time Windows* (2E-CVRP-HFSDTW). Foi feito o planejamento da logística reversa de pneus inservíveis estruturada em centros de consolidação de pneus (CCP). 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. 12 instâncias foram testadas apresentando *gap* de no mínimo 7,66%. Os resultados confirmaram 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.

Fiorot e Rosa (2019) utilizaram o 2E-CVRP como parte de um estudo que abordou a demanda por transporte de mercadorias nos comércios e residências e a existência de restrições de entrada de caminhões de grande porte impostas pelas cidades. Foi desenvolvida uma nova estratégia para realizar as entregas, que combinou recarregamento intermediário na rota, veículos com múltiplos compartimentos, alocação independente das caixas e janela de tempo de atendimento. Foi proposta uma nova classe de problema denominado *Multiple Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows* com objetivo de minimizar o custo total do transporte. O modelo foi testado em instâncias geradas a partir de dados reais de uma empresa. Utilizou-se o CPLEX 12.8 para resolver o modelo e os resultados mostraram que a disponibilidade de mais armazéns intermediários é a estratégia mais econômica.

Wang et al. (2017) abordaram o problema do 2E-CVRP ao elaborar um novo modelo matemático, denominado 2E-CVRP-E, resolvido pelo *software* CPLEX 12.6.3 e um algoritmo. Este modelo visou encontrar as rotas de primeiro e segundo nível com o objetivo de minimizar a soma dos salários dos motoristas, custo de combustível e custo de manuseio. Os motoristas eram pagos de acordo com a duração do percurso. O consumo de combustível dependeu da velocidade, carga e distância. Com isso, o modelo apresentou considerações ambientais, visto que a quantidade total de emissões de CO₂ era proporcional à quantidade de combustível consumido. Além disso também considerou janelas de tempo dos clientes. Foram realizados estudos de caso validados pelos resultados computacionais apresentados para o 2E-CVRP e o 2E-CVRP-E.

Li et al. (2018) apresentaram uma contribuição para o estudo do problema 2E-CVRP adotando restrições de transbordo nos centros de distribuição. Um modelo de programação linear inteira mista para o 2E-DS-RTC foi proposto. Foram feitas restrições utilizando a capacidade máxima de transbordo em tempo real limitada pela capacidade de transbordo ocupada com limitações de tempo para garantir as rotas síncronas nos dois níveis e a pontualidade do serviço de entrega urbana. Algumas instâncias de pequena escala puderam ser resolvidas diretamente pelo CPLEX para encontrar soluções exatas. Os resultados computacionais de instâncias realistas indicaram que a heurística pode resolver várias instâncias de escala do 2E-DS-RTC

de forma que a qualidade da solução e o tempo de cálculo sejam aceitáveis. Portanto, forneceram rotas otimizadas para liberar sincronicamente os caminhões e os veículos menos poluentes de pequena capacidade de modo a garantir a pontualidade do serviço de entrega urbana.

Darvish *et al.* (2019) introduziram o problema FLRP-2E e propuseram uma formulação de programação matemática junto com diferentes classes de desigualdades válidas. Além disso, foi proposto um método exato baseado na interação entre algoritmos *branch-and-bound*. O artigo propôs o problema de roteamento em dois níveis, no qual a mercadoria é enviada primeiro de um único depósito para um conjunto de Centros de Distribuição (CDs). Depois, a partir dos CDs, é entregue aos clientes. Foi analisado a flexibilidade no projeto da rede, relacionada à possibilidade de locação de qualquer um dos Centro de Distribuições (CDs) em qualquer período do horizonte de planejamento e a flexibilidade nos prazos, que é a possibilidade de atender um cliente entre o período de ajuste do pedido e o vencimento. O objetivo foi minimizar o custo total que consistiu na soma do custo de transporte do depósito para os CDs, o custo de viagem dos CDs para os clientes, o custo do aluguel dos CDs e o custo da multa por datas de vencimento não cumpridas. Resultados computacionais em instâncias geradas mostraram o valor de cada um dos dois tipos de flexibilidade. O algoritmo exato foi capaz de fornecer soluções de alta qualidade para instâncias de pequeno e médio porte.

Babagolzadeh *et al.* (2018) desenvolveram um modelo matemático que uniu o problema de OVRP com o sistema de distribuição de dois níveis, denominado 2E-OVRP-E, em que um depósito central distribuiu produtos para um grupo de clientes usando um conjunto de centros de distribuições e um terminal. O objetivo do modelo foi minimizar os custos totais, entre eles estão o custo de transporte no primeiro nível, custos de manuseio, custos fixos de veículos no segundo nível, custos de combustível no segundo nível e custos de penalidades resultantes de violações de janela de tempo. Foi concluído que os produtos são entregues dentro da janela de tempo especificada se houver uma distribuição ideal da carga de trabalho nos centros de distribuição, e pode levar à redução dos custos totais em alguns casos.

Muhlbauer e Fontaine (2020), propuseram um tipo de 2E-CVRP no qual bicicletas de carga são utilizadas como uma alternativa as vans na logística urbana. Nesse estudo

foram criados satélites onde as vans transferiam a carga para bicicletas. Eles propuseram que essa carga fosse alocada em pequenos containers feitos para tal sendo que esses containers são facilmente transferidos da van para a bicicleta. Esse problema de acordo com os autores pode ser chamado de *The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Swap Containers (2E-CVRPSC)*. Nesse problema foi considerada a matriz de distância assimétrica, buscando a trazer mais realidade ao problema, sendo que com o uso das instâncias assimétricas foi possível um melhor estudo de caso, onde foi possível fazer uma análise ambiental e econômica das bicicletas de carga na entrega de última milha (*last-mile delivery*). Nesse trabalho a heurística foi implementada em C++11. Como resultado foi encontrado que quanto maior o número de satélites menor o custo de transporte, no entanto esse mesmo estudo mostrou que um grande número de satélites pode impactar significativamente os custos operacionais. Os bons resultados foram atingidos quando desconsiderados os custos dos satélites onde foi possível uma redução de custo entre 6%-10%. Além desse ganho utilizando bicicletas no segundo nível ao invés de vans foi encontrada uma redução de emissão de CO₂ entre 18%-38%. O que mostra que soluções ambientalmente responsáveis podem ser alcançadas com o auxílio de ferramentas computacionais.

Nessa mesma linha, Nolz e Absi (2020) em seu artigo buscaram avaliar a sincronização entre os níveis do 2E-CVRP. O primeiro nível seria a transferência dos bens de um armazém para um *hub* no centro da cidade, de onde partiriam veículos ambientalmente eficientes para realizar a entrega aos consumidores finais. Governos sempre buscam inserir regulações de trânsito para reduzir os efeitos do transporte, e alguns inclusive incentivam o uso de veículos que geram menos impactos ambientais outros definem janelas para atuação de veículos. Nesse problema é considerada a janela de tempo (*time window*), tornando esse problema um problema de otimização conhecido como *Capacitated Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Time Windows (C2E-VRPTW)*. O algoritmo para resolver esse problema foi desenvolvido em C++, sendo uma heurística de 3 fases: algoritmo genético, busca local e programação inteira. A originalidade desse problema é a utilização do *hub* como suporte a sincronização dos níveis, sendo que alguns clientes são atendidos diretamente do depósito do primeiro nível.

Em consonância com a visão adotada nos últimos anos no 2E-CVRP, Breunig e Baldacci (2019) propuseram a utilização de veículos elétricos no segundo nível da distribuição, em um problema que os autores nomearam como *Electric Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* (E2EVRP). Nesse estudo foi levantado que embora os veículos elétricos sejam de maneira geral ambientalmente eficientes, eles também enfrentam alguns desafios, como a sua autonomia, o que leva a visitas planejadas as estações de carregamento. Com foco nesse problema os autores criaram um modelo na qual os satélites também funcionavam como estação de carregamento dos veículos elétricos. Em suma a diferença dessa abordagem é a análise da autonomia dos veículos de segundo nível. Para a avaliação desse modelo foi criado instâncias de média escala para serem executadas no CPLEX 12.5.1. a comparação das soluções encontradas pelo método heurístico como o modelo matemático apresentou excelente performance para os 2 algoritmos.

Liu e Luo (2017) utilizaram de uma característica regional que define regiões administrativas em seu país, para abordarem uma outra variante do 2E-CVRP, a variante em questão é a *Two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints* (2E-CVRPGC). Para abordar esse problema os autores formularam o problema como um problema de programação inteira mista utilizando o CPLEX. Eles inclusive propuseram validamente cinco famílias de inequações para o fortalecimento do modelo. Nesse estudo também foi conduzido experimento para analisar o impacto das restrições de grupo frente ao problema padrão. Em sua conclusão foi notado que a aplicação de restrições de grupo impactou de maneira total os resultados encontrados, mostrando que o agrupamento pode influenciar de maneira significativa o problema de roteamento.

Kancharla *et al.* (2013) resolveram o *Multi-Depot Two Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem* (MD2E-CVRP), que é uma variante do Problema de Roteamento de Veículos (VRP) com frotas heterogêneas em ambos os níveis. Propuseram um *Simulated Annealing* (SA) baseado no algoritmo de solução heurística e testado no padrão 2E-CVRP e MD2E-CVRP. Em conclusão, o SA teve uma boa qualidade de solução em apenas um quinquagésimo do computacional tempo usando CPLEX. A principal contribuição deste artigo é um algoritmo *Simulated Annealing* (SA) para o problema de roteamento de dois níveis, considerando múltiplos depósitos e frotas heterogêneas.

Dellaert *et al.* (2019) exploraram o problema de roteamento 2E-CVRP com múltiplas mercadorias e com janelas de tempo. Neste problema os autores levaram em conta a origem específica do cliente até o destino. Os principais aspectos que foram explorados na estrutura do problema, propuseram um esquema de decomposição que desacopla os problemas de roteamento do primeiro e do segundo nível, excluindo o terceiro componente, e os reacopla usando restrições que garantem o movimento de mercadorias entre os dois níveis. Com base nesta decomposição, apresentaram uma série de formulações de modelos para o MC-2E-VRPTW e desenvolveram uma abordagem de solução exata para este problema da vida real.

Sluijk *et al.* (2021) formularam a roteirização de veículos em dois níveis com demandas estocásticas e um problema de com restrição de acesso, onde a total demanda dos clientes em cada rota de segundo nível teve que se enquadrar na capacidade do veículo. Foi proposto dois procedimentos de solução eficientes baseados na geração de colunas. Foi proposta uma nova rotulagem de algoritmo baseado na construção simultânea de rotas de segundo nível e um algoritmo de rotulagem que definiu rotas de segundo nível sequencialmente. Para melhorar ainda mais o desempenho da solução, foram utilizadas técnicas de inferência estatística para garantir que as restrições de chance fossem atendidas.

2.2 TRANSPORTE AQUAVIÁRIO DE CARGA

O transporte aquaviário urbano ainda é um desafio para as cidades, entretanto seu desenvolvimento se tornou uma necessidade. A seguir, alguns estudos que foram desenvolvidos sobre o transporte aquaviário. A maioria ainda trata esta abordagem de forma qualitativa, sobre as vantagens e desvantagens do sistema.

Nepveu (2020) explorou de forma qualitativa a implementação do transporte aquaviário. A pesquisa se desenvolve em forma de estudo de caso na cidade de Amsterdã, uma cidade com ruas estreitas e larga presença de canais. O autor abordou os dilemas da cidade e cita que o transporte de cargas é o principal motivo dos congestionamentos. Com um método qualitativo de pesquisa, entrevistas, grupo de discussão e a triangulação de informações o autor conclui que os tipos de carga transportados pelo modo aquaviário são: materiais da construção civil, alimentos não

perceíveis e produtos do varejo. A implementação deste transporte é considerada uma solução sustentável.

Chen *et al.* (2019) criaram um algoritmo para reduzir os conflitos nas interseções de canais urbanos. A formação de filas em canais de cidades como Amsterdã (Holanda) e Jiangsu (China) são comuns, por se tratar de cidades que possuem este transporte ativo. Foi desenvolvida uma ferramenta autônoma que auxilia nas escalas das embarcações e rotas para evitar o cruzamento dessas embarcações nos canais, diminuindo assim, os tempos de espera e congestionamentos. Experimentos e simulações foram realizados e conclui-se que com esta ferramenta é possível implementar um transporte mais eficiente e seguro.

Pompermayer *et al.* (2014) afirmaram que este modo de transporte é pouco utilizado no Brasil, seja em âmbito de navegação de interior, seja no meio urbano. Com uma perspectiva histórica, avaliaram-se as potencialidades de uso, em especial para o escoamento da produção agrícola. Foram feitas comparação entre os custos de operação e implantação de uma hidrovia e de uma ferrovia. Apesar de estes custos dependerem da navegabilidade natural do rio, a conta acabou sendo favorável à hidrovia, especialmente em rios de baixo e médio curso. A análise institucional indica que apesar de ser o modo de transporte que recebe menos investimentos públicos, há um maior número de órgãos envolvidos, com diversos planos e programas em andamento, mas sem a devida integração. Além disso, há carência de informações confiáveis sobre o custo dos investimentos necessários. A análise recomenda que a implantação e a operação de hidrovias sejam transferidas à iniciativa privada, por meio de concessão simples, com cobrança de pedágio, permitindo agilizar as obras necessárias e dando perspectivas de continuidade das operações aos transportadores.

Solomon *et al.* (2020) abordaram um estudo de caso de transporte aquaviário de longo curso em Gana de forma qualitativa. Levantaram informações sobre os principais empecilhos para devido desenvolvimento deste transporte no país, como: mercado, infraestrutura, frota e qualificação de mão-de-obra. Os autores abordam que mesmo com as adversidades operacionais encontradas, este transporte sustentável falta incentivo por parte da iniciativa pública, legislações adequadas e empresas do ramo logístico que se sintam atraídas em prestar o serviço.

Diziain *et al.* (2014) caracterizaram o transporte ferroviário e aquaviário em áreas urbanas da França e Japão. Foram discutidas propostas que envolvem o planejamento urbano e uso e ocupação do solo. De forma qualitativa apresentaram políticas públicas de logística e afirmaram a importância deste assunto nas pautas governamentais. Ressaltaram que os transportes ferroviário e aquaviário precisam ser integrados a outros modos para realização da entrega final ao cliente, por isto são caracterizados por transportarem maior quantidade e volume dentro do fluxo de transportes. Na comparação entre o transporte urbano de carga, a França se mostra mais engajada com as políticas de logística. No Japão, o cenário é de extremo controle pelo governo, com poucos projetos que colaborem com a integração. Estes preferem iniciativas público-privadas para desenvolver o cenário logístico, mas não especificamente nas áreas urbanas.

Observou-se que o transporte aquaviário foi abordado na literatura, nos poucos trabalhos encontrados, de forma qualitativa. Desta forma, o presente estudo abrange um assunto pouco explorado, e apresenta um modelo matemático e instâncias que trazem resultados concretos em sua conclusão.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de transporte aquaviário de passageiros a ser implantado pelo Estado, nas cidades de Vitória, Vila Velha e Cariacica, visa atender uma demanda de passageiros que possuem apenas duas pontes para atravessar o canal de Vitória. A população de Vitória gira em torno de 365.855 habitantes, Vila Velha possui 501.325 habitantes e Cariacica possui 383.917 habitantes (IBGE, 2018).

O problema abordado neste trabalho origina da oportunidade de utilizar a infraestrutura dos Terminais Aquaviários (TAs) públicos de passageiros para receberem também embarcações marítimas. Operadores logísticos poderiam usufruir dos TAs para distribuir cargas e gerar receita alternativa para o governo com o pagamento por atracação. Em paralelo, este sistema visa contribuir com a mobilidade da cidade ao reduzir a quantidade de veículos pesados adentrando as cidades. Comparando com o sistema convencional de entregas rodoviárias, entende-se que esta questão é multidimensional, pois envolve não só os fornecedores, estoques e clientes, mas também as conexões entre os modos de transportes, estacionamento de veículos e sucesso nas entregas. Em uma primeira etapa, é possível conectar um Centro de Consolidação de Carga (CCC) aos TAs (Figura 4). Já em uma segunda etapa de transporte, veículos terrestres fazem suas viagens até o cliente final.

Figura 4 - Terminal Aquaviário (imagem 3D)

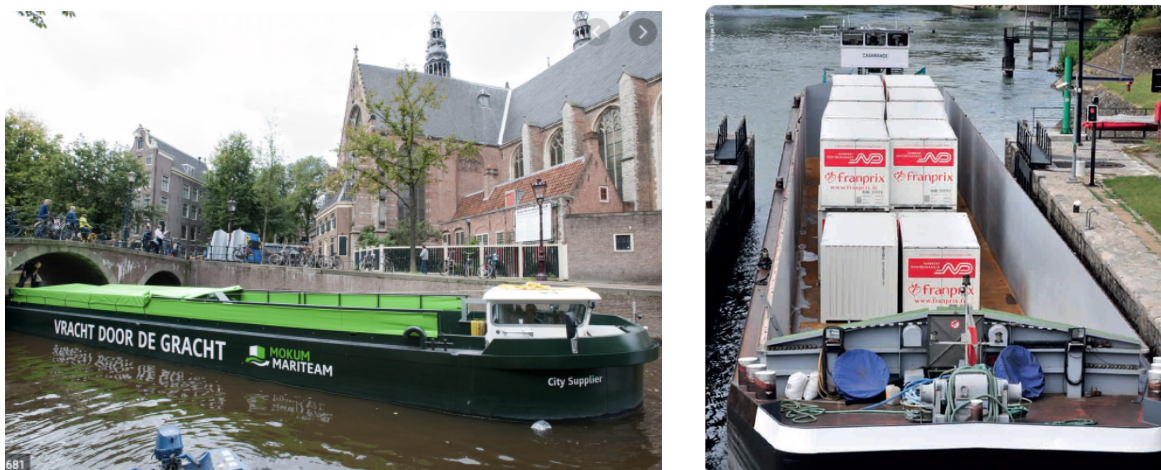


Fonte: SEMOBI-ES (2021).

Cotidianamente, as empresas de logística urbana já operam em duas etapas. Veículos rodoviários de grande porte partem de um depósito central para atender depósitos intermediários, denominados centros de distribuição (CDs). Posteriormente, veículos rodoviários de diversos tipos são abastecidos e realiza-se a entrega até o cliente (MANCINI, 2013). Não obstante, partir para soluções que integrem o transporte aquaviário, é possível substituir os caminhões de grande porte por embarcações, e substituir os caminhões menores por bicicletas e motocicletas. A fim de diminuir os transtornos com congestionamento, níveis de ruído e poluição atmosférica. Além disto, problemas como sobrecarga das pontes por conta do elevado peso dos caminhões gera prejuízos de manutenção ao poder público.

Não foram encontrados modelos similares a este operando no mundo, entretanto, existem referências de transporte aquaviário urbano para carga (Figura 5). Amsterdã possui um sistema denominado *City Supplier*, criado para abastecer com diversos tipos de insumos empreendimentos e comércio local. Segundo a *Sustainable Urban Transport*, na China tem-se utilizado *containers* sobre balsas para transportar materiais da construção civil (SUTP, 2021).

Figura 5 - Exemplos de embarcações para transporte de cargas via aquaviário



Fonte: *Sustainable Urban Transport* – SUTP (2021).

Nesta mesma linha, um projeto experimental feito na Suécia, utilizou *containers* da empresa de logística DHL para realizar testes de carregamento e transbordo de cargas em balsas (Figura 6). Os *containers* já equipados com rodinhas, passaram por uma estrutura móvel fixada no píer e após o deslocamento feito por balsas até o outro

lado do canal, o *container* foi fixado em bicicletas adaptadas para percorrer o trajeto terrestre.

Figura 6 - Transporte de mercadorias via modo aquaviário integrado ao terrestre



Fonte: Pling Transport (SUÉCIA, 2017)

A cidade de Vitória, capital do Espírito Santo, possui hidrografia favorável para o desenvolvimento do transporte aquaviário urbano ainda mais por se tratar de uma ilha. Os TAs que farão parte do sistema integrado são: Porto Santana (Cariacica), Centro (Vitória), Praça do Papa (Vitória) e Prainha (Velha). O Centro de Consolidação de Cargas (CCC), se localiza na parte continental de Cariacica por se tratar de um local que possui acesso favorável para a chegada de caminhões de grande porte (BR-101 e ES-080). Este, não possui restrições de acesso, podendo receber volume de carga durante o dia e a noite. Os demais TAs funcionarão como centro de distribuição e serão abastecidos pelas cargas consolidadas no CCC via o transporte aquaviário. Também serão testados cenários de expansão, com 3 (três) TAs a mais disponíveis para o roteamento. São eles: Ilha das Caieiras (Vitória), Ufes (Vitória) e Ilha das Flores (Vila Velha).

Observa-se na Tabela 1 um resumo das informações dos TAs. A Denominação diz a respeito da área que se encontra o TA. A Localização é referente à cidade que o TA

se encontra. A classificação indica se o TA é existente (faz parte do projeto original) ou é do cenário de expansão.

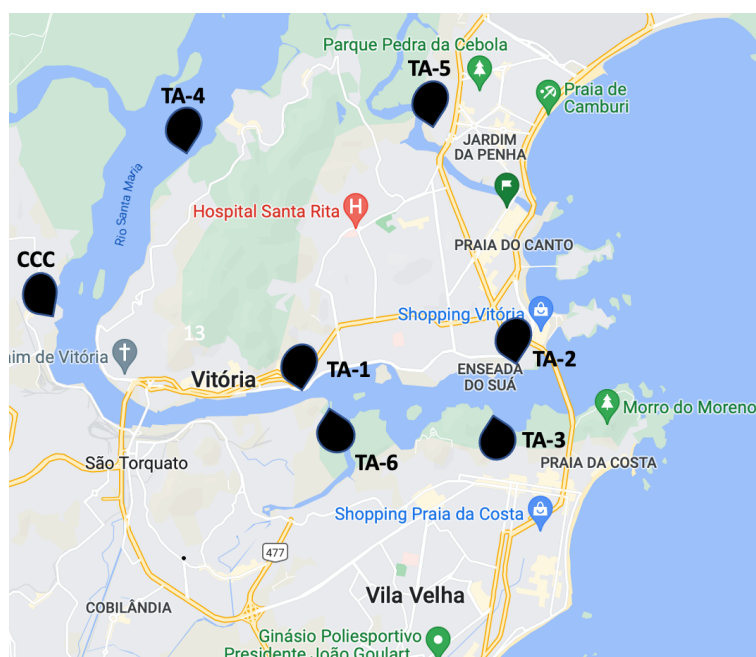
Tabela 1 - Denominação, localização e Classificação dos TAs

| TAs | Denominação | Localização | Classificação |
|------|-------------------|-------------|---------------|
| TA-1 | Centro | Vitória | Existente |
| TA-2 | Praça do Papa | Vitória | |
| TA-3 | Prainha | Vila Velha | |
| TA-4 | Ilha das Caieiras | Vitória | Expansão |
| TA-5 | Ufes | Vitória | |
| TA-6 | Ilha das Flores | Vila Velha | |

Fonte: da Autora.

A localização dos TAs é conhecida, e a capacidade é delimitada pelo tamanho do TA proposto pelo Governo do Estado para o transporte de passageiros. Na Figura 7, pode-se observar que o TA-1, TA-2, TA-4 e TA-5 encontram-se no município de Vitória e o TA-3 e TA-6 foram alocados em Vila Velha. O CCC encontra-se em Cariacica, em posição mais afastada.

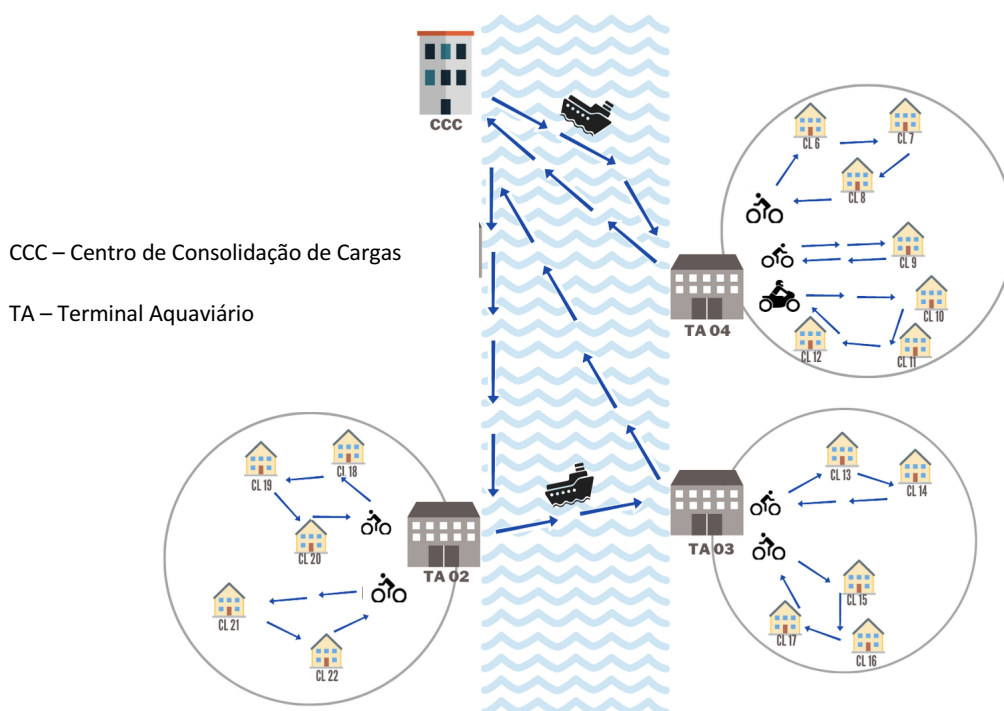
Figura 7 - Localização do CCC e dos TAs



Fonte: da Autora.

A distribuição das cargas deve iniciar dentro de um período com início e término pré-definidos, em função dos prazos de entrega e respeito à carga horária dos funcionários. Esses períodos são chamados janelas de tempo. Durante o planejamento das rotas, o CCC é o ponto de partida das embarcações e os TAs são visitados somente uma única vez por uma ou mais embarcações. Na Figura 8, observa-se um exemplo aplicado. Duas embarcações diferentes (frota heterogênea) na primeira etapa realizam as viagens para abastecer os TAs. Na segunda etapa, os veículos realizam as rotas terrestres e estas são planejadas de forma integrada. Também é permitido o uso de diferentes tipos de veículos, e isto permite a aplicação de restrições de acesso, onde deve haver compatibilidade no tipo de veículo que irá atender determinado cliente. As rotas são representadas pelas setas. No caso deste problema, optou-se por utilizar somente bicicletas e motocicletas no transporte terrestre.

Figura 8 - Estratégia de integração do transporte aquaviário com o terrestre



Fonte: da Autora.

A seguir, algumas características do problema abordado:

- Não é necessário que todos os TAs sejam utilizados;
- Todos os clientes precisam ser atendidos;
- Cada TA possui sua própria frota de veículos terrestres;

- As embarcações e os veículos disponíveis para o roteamento não precisam ser necessariamente todos utilizados;
- O planejamento das rotas da 1ª etapa e da 2ª etapa são planejadas de forma integrada;
- A capacidade do CCC é determinada pela capacidade dos TAs
- As embarcações e os veículos possuem capacidade limitada.

Cada carga possui um peso (quilogramas) e como os veículos podem realizar múltiplas viagens, um único veículo pode transportar uma quantidade de cargas maior que sua capacidade, pois este fará as entregas aos clientes e retornará para seu respectivo TA para ser reabastecido de novas cargas. O planejamento das rotas integradas e das múltiplas viagens terrestres buscam aproveitar ao máximo a capacidade de transporte das embarcações e veículos. Com isso, reduzir os custos de transportes com a otimização da quantidade de embarcações e veículos, quilometragem percorrida e atracações.

O operador logístico planeja as viagens de acordo com os prazos de entrega dos clientes. As entregas não estão necessariamente associadas à um terminal aquaviário, porém as entregas localizadas em um lado do canal só podem ser atendidas pelos terminais localizados neste mesmo lado do canal. Portanto, este problema de pesquisa trata do planejamento das viagens assumindo que os veículos não possam atravessar o canal para atender clientes que se encontram em lados opostos.

O planejamento das viagens e das frotas é o ponto chave para uma operação de sucesso. Como a frota é heterogênea, composta por veículos de diferentes tipos e capacidades, o planejamento colabora com a decisão de quantos e quais embarcações e veículos devem ser contratados. Assim, é necessário implementar um modelo matemático que defina a frota de veículos mais econômica que atenda a demanda dos clientes, considerando a logística em duas etapas.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto é um problema de roteamento de veículos capaz de planejar rotas que possuem multimodalidade de transporte, ou seja, possuem duas etapas de distribuição com inspiração no 2E-CVRP. As frotas das embarcações e dos veículos são heterogêneas, pois possuem diferentes capacidades em peso de carga. No modelo matemático referente à segunda etapa foram inseridas restrições de múltiplas viagens, janela de tempo e restrição de acesso. Na primeira etapa, são as embarcações que distribuem e remanejam as cargas entre o CCC e TAs, distribuídos ao longo de um canal. Os veículos da segunda etapa são terrestres, como bicicletas e motocicletas. Não é necessário que todos os TAs sejam utilizados e todos os clientes precisam ser atendidos. Cada TA possui sua própria frota de veículos terrestres e não precisam ser necessariamente todos utilizados. O planejamento das rotas da primeira etapa e da segunda etapa acontecem de forma integrada e os veículos e embarcações possuem capacidade limitada.

O modelo proposto busca definir as viagens das embarcações e veículos visando a redução dos custos de transporte das entregas. Desta forma, a função objetivo (FO) minimiza os custos relacionados à frota necessária para atender a demanda, a distância total percorrida pelas embarcações e veículos e quantidade de atracções realizadas nos TAs. As rotas aquaviárias iniciam e terminam no Centro de Consolidação de Carga CCC. As rotas terrestres iniciam e terminam nos TAs e em cada viagem os veículos devem entregar para pelo menos um cliente, ou seja, transportar pelo menos uma carga.

O modelo matemático é apresentado em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

4.1 CONJUNTOS E PARÂMETROS

Considerando nc a quantidade de clientes; nt a quantidade de TAs; ne a quantidade de embarcações; nv a quantidade de veículos terrestres; no representa os diferentes tipos de veículos terrestres, nd representa os diferentes lados do canal. O conjunto $V1 = \{\{0\} \cup VT\}$ representa a 1ª etapa, sendo o CCC representado por $\{0\}$. O conjunto

$V2 = \{VT \cup VC\}$ representa a segunda etapa. O conjunto $R = \{1, \dots, rt\}$ representa a quantidade de possíveis rotas dos veículos da segunda etapa.

Os conjuntos são:

| | |
|------------------------|--|
| VT | Conjunto de TAs, $VT = \{1, \dots, nt\}$; |
| VC | Conjunto de clientes, $VC = \{1, \dots, nc\}$; |
| $V1$ | Conjunto dos nós da primeira etapa, $V1 = \{0, \dots, nt\}$; |
| $V2$ | Conjunto dos nós da segunda etapa, $V2 = \{1, \dots, nt + nc\}$; |
| E | Conjunto das embarcações da primeira etapa, $E = \{1, \dots, ne\}$; |
| K | Conjunto dos veículos da segunda etapa, $K = \{1, \dots, nv\}$; |
| KT | Conjunto dos diversos tipos de veículos da segunda etapa $KT = \{1, \dots, no\}$; |
| TT | Conjunto dos diversos lados do canal $TT = \{1, \dots, nd\}$; |
| R | Conjunto de rotas da segunda etapa $R = \{1, \dots, rt\}$. |

Os parâmetros são:

| | |
|-----------------------------|--|
| rt | Quantidade de rotas dos veículos terrestres; |
| f_v | Tipo do veículo $v \in K$; |
| b_t | Tipo de TA $t \in VT$; |
| $g_{i,k}$ | Parâmetro que tem o valor de 1 caso o cliente $i \in VC$ possa ser atendido pelo veículo do tipo $k \in KT$ e 0, caso contrário; |
| $c_{i,a}$ | Parâmetro que tem o valor de 1 caso o cliente $i \in VC$ pertença ao mesmo lado que o TA do tipo $a \in TT$ e 0, caso contrário; |
| l_e | Capacidade da embarcação $e \in E$; |
| n_v | Capacidade de cada veículo da 2ª etapa $v \in K$; |
| d_i | Demanda de entrega para cada cliente $i \in V2$; |

| | |
|--------------------------------|--|
| M | Parâmetro utilizado para a lógica do modelo que assume um valor suficientemente grande; |
| m | Parâmetro utilizado para a lógica do modelo que assume um valor suficientemente pequeno; |
| $o_{i,j}$ | Custo em percorrer o arco $(i,j) \in V1$ da 1ª etapa; |
| $p_{i,j}$ | Comprimento em quilômetro, do arco $(i,j) \in V2$ da 2ª etapa; |
| s_e | Custo por quilômetro percorrido na 1ª etapa do veículo $e \in E$; |
| q_v | Custo por quilômetro percorrido na 2ª etapa do veículo $v \in K$; |
| h_t | Custo de atracação no TA $t \in VT$; |
| e_e | Custo fixo de transporte para cada embarcação $e \in E$; |
| u_v | Custo fixo de transporte de cada veículo $v \in K$; |
| r_v | Indica a qual TA $t \in VT$ pertence o veículo $v \in K$; |
| t_t | Número de veículos disponíveis no TA $t \in VT$. Cada TA possui uma frota de t_t veículos, definida para atender seus clientes e que não pode ser compartilhada com outros satélites; |
| $vg_{i,j,e}$ | Tempo de viagem da embarcação $e \in E$ no arco $(i,j) \in V1$ da 1ª etapa; |
| $vm_{i,j,v}$ | Tempo de viagem de um veículo $v \in K$ em um arco $(i,j) \in V2$ da 2ª etapa; |
| tws_i | Término da janela de tempo do cliente $i \in NC$ da 2ª etapa; |
| twe_i | Início da janela de tempo do cliente $i \in NC$ da 2ª etapa; |
| Tme | Tempo máximo de viagem em uma rota da embarcação $e \in E$ da 1ª etapa; |
| Tmv | Tempo máximo de viagem em uma rota do veículo $v \in K$ da 2ª etapa; |
| vl_e | Vetor de velocidade das embarcações $e \in E$; |
| vn_v | Vetor de velocidade dos veículos $v \in K$; |
| op | Tempo de operação das cargas a serem entregues. |

4.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO

As variáveis decisão da primeira etapa são:

| | |
|------------------|--|
| $\alpha_{i,j,e}$ | Variável binária que assume valor igual a 1 se uma embarcação $e \in E$ percorrer um arco $(i,j) \in V1$, caso contrário seu valor é 0; |
| $\eta_{t,e}$ | Quantidade de carga entregue no TA $t \in VT$ por uma embarcação $e \in E$ proveniente do CCC; |
| $\mu_{t,e}$ | Define a posição do TA $t \in VT$ na rota da embarcação $e \in E$; |
| u_e | Variável binária que assume valor igual a 1 se uma embarcação $e \in E$ é utilizada e assume valor 0, caso contrário; |

As variáveis decisão da segunda etapa são:

| | |
|---------------------|---|
| $\phi_{i,j,t,v,r}$ | Representa a carga de um veículo $v \in K$ ao chegar no nó $j \in V2$ vindo do nó $i \in V2$. Refere-se à rota $r \in R$ do veículo $v \in K$ iniciada no TA $t \in VT$; |
| $\beta_{i,j,t,v,r}$ | Variável binária que assume valor igual a 1 se o veículo $v \in K$ percorre um arco $(i,j) \in V2$, considerando que ele inicia sua rota $r \in R$ em um TA $t \in VT$, e assume valor 0, caso contrário; |
| τ_t | Total de carga a ser entregue nos clientes da 2ª etapa que são provenientes dos TAs $t \in VT$; |
| σ_v | Variável binária que assume valor igual a 1 se um veículo $v \in K$ é utilizado e assume valor 0, caso contrário; |
| $T_{i,v,r}$ | Momento que o veículo $v \in K$ da rota $r \in R$ chega no cliente $i \in VC$ da 2ª etapa. |

4.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A Função Objetivo, representada pela Equação (1), foi dividida em cinco partes e indica o custo total de distribuição do sistema que deve ser minimizado. A primeira parcela dessa Equação (1) representa o custo das viagens realizadas através dos arcos $(i,j) \in V1$, ou seja, o custo da distância percorrida pelas embarcações. Enquanto a segunda parcela da Equação (1) representa o custo das viagens realizadas através dos arcos $(i,j) \in V2$, ou seja, o custo da distância percorrida pelos veículos. A terceira parcela da Equação (1) quantifica o custo h_t em utilizar o TA $t \in VT$, ou seja, o custo de atracação das embarcações nos TAs. Por fim, a quarta e quinta parcela da Equação (1) representam o custo fixo das embarcações e dos veículos da

primeira e segunda etapas que foram efetivamente utilizados no roteamento para atender a demanda.

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar: } & \sum_{e \in E} \sum_{t \in VT} s_e o_{i,j} \alpha_{i,j,e} + \sum_{t \in VT} \sum_{i \in V2} \sum_{j \in V2} \sum_{v \in K} \sum_{r \in R} p_{i,j} \beta_{i,j,t,v,r} q_v \\
& + \sum_{t \in VT} h_t \sum_{e \in E} \sum_{i \in V1} \alpha_{i,t,e} + \sum_{e \in E} \sum_{t \in VT} \alpha_{0,t,e} e_e + \sum_{v \in K} \sigma_v u_v
\end{aligned} \tag{1}$$

4.4 RESTRIÇÕES

O modelo matemático contempla restrições para frotas heterogêneas com múltiplas viagens, janelas de tempo e restrições de acesso. As restrições (2) a (9) são da 1ª etapa de transporte (aquaviário).

Sujeito a:

RESTRIÇÕES DA 1ª ETAPA

As Restrições (2) asseguram a conservação de fluxo das embarcações $e \in E$ em cada TA $t \in VT$. As Restrições (3) garantem que uma embarcação $e \in E$ visita um TA $t \in VT$ no máximo uma vez. As Restrições (4) garantem que um TA seja visitado uma única vez por somente uma embarcação. As Restrições (5), (6) e (7) evitam a formação de subtour na 1ª etapa. As Restrições (8) e (9) impedem que a capacidade l_e das embarcações $e \in E$ seja excedida. As Restrições (10) estabelecem que toda carga que chega a um TA $t \in VT$ deve ser distribuída por esse TA.

$$\sum_{j \in V1} \alpha_{t,j,e} - \sum_{i \in V1} \alpha_{i,t,e} = 0 \quad \forall t \in VT, e \in E \tag{2}$$

$$\sum_{j \in V1} \alpha_{t,j,e} \leq 1 \quad \forall t \in V1, e \in E \tag{3}$$

$$\sum_{j \in V1} \sum_{e \in E} \alpha_{t,j,e} \leq 1 \quad \forall t \in V1 \tag{4}$$

$$\mu_{i,e} + 1 \leq \mu_{j,e} + (1 - \alpha_{i,j,e}) M \quad \forall (i,j) \in VT, e \in E \tag{5}$$

$$\mu_{t,e} \geq 0 \quad \forall t \in VT, e \in E \quad (6)$$

$$\mu_{t,e} \leq nt \sum_{j \in V1} \alpha_{t,j,e} \quad \forall t \in VT, e \in E \quad (7)$$

$$\eta_{t,e} \leq l_e \sum_{j \in V1} \alpha_{t,j,e} \quad \forall t \in VT, e \in E \quad (8)$$

$$\sum_{t \in VT} \eta_{t,e} \leq l_e \quad \forall e \in E \quad (9)$$

$$\sum_{e \in E} \eta_{t,e} = \tau_t \quad \forall t \in VT \quad (10)$$

RESTRICÇÕES DA 2ª ETAPA

As Restrições (11) interligam a primeira etapa com a segunda etapa e impede que um TA não utilizado no roteamento da primeira etapa seja utilizado na segunda etapa. As Restrições (12) garantem que todo cliente $i \in VC$ seja atendido. As Restrições (13) determinam a conservação de fluxo de veículos $v \in K$ em cada cliente $i \in VC$. As Restrições (14) eliminam o tráfego entre TAs $t \in VT$ no roteamento da segunda etapa. As Restrições (15) e (16) restringem a quantidade de veículos $v \in K$ utilizados para a distribuição de cargas de cada TA $t \in VT$. As Restrições (17) limitam que cada veículo $v \in K$ visitar um TA somente uma vez durante a rota. As Restrições (18) e (19) contam quantos veículos foram utilizados no roteamento segunda etapa. As Restrições (20) e (21) garantem que a capacidade n_v dos veículos $v \in K$ não seja excedida. As Restrições (22) indicam que a soma do carregamento de todos os veículos $v \in K$ pertencentes a um determinado TA $t \in VT$ deve ser igual a tudo que é entregue ao TA pelo CCC.

$$\sum_{i \in V2} \beta_{t,i,t,v,r} \leq \sum_{j \in V1} \sum_{e \in E} \alpha_{t,j,e} \quad \forall t \in VT, \quad v \in K, \quad r \in R \quad (11)$$

$$\sum_{t \in VT} \sum_{\{j \in V2 \mid j \neq (i+nt)\}} \sum_{\{v \in K \mid r_v = t\}} \sum_{r \in R} \beta_{(i+nt),j,t,v,r} = 1 \quad \forall i \in VC \quad (12)$$

$$\sum_{\{j \in V2 | j \neq (i+nt)\}} \beta_{j,(i+nt),t,v,r} - \sum_{\{j \in V2 | j \neq (i+nt)\}} \beta_{(i+nt),j,t,v,r} = 0 \quad \forall i \in VC, t \in VT, v \in K, r \in R \quad (13)$$

$$\sum_{\{m \in VT | m \neq t\}} \left(\sum_{i \in VC} \beta_{t,(i+nt),m,v,r} + \sum_{i \in VC} \beta_{(i+nt),t,m,v,r} \right) = 0 \quad \forall t \in VT, v \in K, r \in R \quad (14)$$

$$\sum_{v \in K} \sigma_v \leq nv \quad (15)$$

$$\sum_{v \in K | r_v = t} \sigma_v \leq t_t \quad \forall t \in VT \quad (16)$$

$$\sum_{\{t \in VT | t \neq j\}} \sum_{j \in V2} \beta_{t,j,t,v,r} \leq 1 \quad \forall v \in K, r \in R \quad (17)$$

$$\sigma_v \geq m \sum_{\{t \in VT | t \neq j\}} \sum_{j \in V2} \sum_{r \in R} \beta_{t,j,t,v,r} \quad \forall v \in K \quad (18)$$

$$\sigma_v \leq M \sum_{\{t \in VT | t \neq j\}} \sum_{j \in V2} \sum_{r \in R} \beta_{t,j,t,v,r} \quad \forall v \in K \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\{t \in VT | r_v = t\}} \sum_{\{j \in V2 | j \neq (i+nt)\}} \phi_{(i+nt),j,t,v,r} \\ & \geq \left(\left(\sum_{\{t \in VT | r_v = t\}} \sum_{\{j \in V2 | j \neq (i+nt)\}} \beta_{(i+nt),j,t,v,r} \right) - 1 \right) M \quad \forall i \in VC, v \in K, r \in R \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + d_{(i+nt)} + \sum_{\{t \in VT | r_v = t\}} \sum_{\{j \in V2 | j \neq (i+nt)\}} \phi_{j,(i+nt),t,v,r} \\ & \phi_{i,j,t,v,r} \leq n_v \beta_{i,j,t,v,r} \quad \forall t \in VT, (i,j) \in V2, v \in K, r \in R, \quad r_v = t \quad (21) \end{aligned}$$

$$\tau_t = \sum_{i \in VC} \sum_{v \in K} \sum_{r \in R} \phi_{(i+nt),t,t,v,r} \quad \forall t \in VT \quad (22)$$

RESTRIÇÕES DE ACESSO

As Restrições (23) asseguram que o veículo da segunda etapa só pode atender um cliente se o tipo do veículo for compatível com o tipo que o cliente pode receber. As Restrições (24) asseguram que determinado cliente só pode ser atendido pelo TA se este cliente estiver do mesmo lado do canal.

$$\sum_{t \in VT} \sum_{j \in V2} \sum_{r \in R} \beta_{j,(i+nt),t,v,r} = 0 \quad \forall i \in VC, v \in K, k \in KT, g_{ik} = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{t \in VT} \sum_{j \in V2} \sum_{v \in K} \sum_{r \in R} \beta_{j,(i+nt),t,v,r} = 0 \quad \forall i \in VC, t \in VT, a \in TT, c_{ia} = 0 \quad (24)$$

RESTRIÇÕES DA JANELA DE TEMPO

As Restrições (25), (26) e (27) garantem que cada cliente $i \in VC$ seja atendido dentro de sua janela de tempo ($tws_i, twei$). As Restrições (28) e (29) garantem que o limite máximo de viagem nas rotas dos veículos da primeira e segunda etapa, respectivamente, sejam respeitadas.

$$\begin{aligned} T_{(j+nt),v,r} &\geq T_{i,v,r} + \\ &((vm_{i,(j+nt)} + op d_i) \beta_{i,(j+nt),t,v,r} \\ &- (M(1 - \beta_{i,(j+nt),t,v,r}))) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \forall t \in VT, i \in V2, j \in VC, k \in KT, \\ r \in R, r_v = t, \quad i \neq j \end{aligned} \quad (25)$$

$$T_{(i+nt),v,r} \leq twei \sum_{t \in VT | r_v = t} \sum_{j \in V2} \beta_{(i+nt),j,t,v,r} \quad \forall i \in VC, v \in K, r \in R \quad (26)$$

$$T_{(i+nt),v} \geq tws_i \sum_{t \in VT | r_v = t} \sum_{j \in V2} \beta_{(i+nt),j,t,v,r} \quad \begin{aligned} \forall i \in VC, v \in K, \\ r \in R \end{aligned} \quad (27)$$

$$\sum_{i \in V2} \sum_{j \in VC} (vm_{i,(j+nt)} + op d_i) \beta_{i,(j+nt),t,v,r} \leq Tm2 \quad \forall t \in VT, v \in K, r \in R, r_v = t \quad (28)$$

$$\sum_{i \in V1} \sum_{j \in V1} vg_{i,j} \alpha_{i,j,e} + \sum_{t \in VT} op \eta_{te} \leq Tm1 \quad \forall e \in E \quad (29)$$

RESTRIÇÕES DE DOMÍNIO

As restrições (30) a (36) definem os domínios das variáveis de decisão do modelo.

$$T_{t,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \in VT, v \in K, r \in R \quad (30)$$

$$\eta_{t,e} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \in VT, e \in E \quad (31)$$

$$\mu_{t,e} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \in VT, e \in E \quad (32)$$

$$\phi_{i,j,t,v,r} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \in VT, (i,j) \in V2, v \in K, \quad (33)$$

$$r \in R$$

$$\tau_t \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \in VT \quad (34)$$

$$\alpha_{i,j,e} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in V1, e \in E \quad (35)$$

$$\beta_{i,j,t,v,r} \in \{0, 1\} \quad \forall t \in VT, (i,j) \in V2, v \in K, r \in R \quad (36)$$

O modelo matemático possui na primeira etapa $|E|(|V1|^2 + |VT| + |1|)$ variáveis de decisão inteiras e $|VT| + |E|$ variáveis de decisão contínuas. Na segunda etapa, as variáveis inteiras são $|K|(1 + |V2|^2|VT| |R|)$ e as reais são $|VT|(|V2|^2|K| |R| + 1) + |VC| |K| |R|$. Portanto, no total, o modelo possui $|K|(1 + |V2|^2|VT| |R|) + |E|(|V1|^2 + |VT| + |1|)$ variáveis decisão inteiras e $|VT|(|V2|^2|K| |R| + 1 + |E|) + |VC| |K| |R|$ variáveis decisão contínuas.

5 EXECUÇÃO DO MODELO

Os experimentos computacionais foram realizados por meio do *solver* IBM® ILOG® CPLEX®, versão 12.20, em um computador com dois processadores Intel® Xeon® Silver, com 16 núcleos cada, e 128 GB de memória RAM.

Foram criadas 21 instâncias de teste divididas em 4 grupos, cada um com um objetivo específico. O tempo máximo de execução para as instâncias do Grupo 1 foi de 3 horas (10.800 s), para o Grupos 2 foi de 8 horas (28.800 s). Para o Grupo 3 o tempo máximo de execução foi de 60 horas (216.000 s) e para o Grupos 4 foi de 24 horas (86.400 s). Esses limites foram estabelecidos porque não se observou melhorias significativas de solução além deles.

O *solver* CPLEX apresenta os resultados para os valores das variáveis de decisão para uma solução ótima ou para a melhor solução encontrada dentro do tempo máximo de execução. Os resultados de execução são os valores da função objetivo (FO), de Upper Bound (UB), Lower Bound (LB), gap ($gap = (UB - LB)/UB$) e tempo de execução (TE). O UB é o limitante superior da solução ótima e, em problemas de minimização, é igual à FO. O LB é o limitante inferior da solução ótima. Quando se obtém solução ótima, o gap é zero. No tempo máximo de execução estabelecido, pode ocorrer do CPLEX não encontrar pelo menos uma solução factível e apresentar somente o valor de LB.

A variável de decisão $\alpha_{i,j,e}$ representa os valores numéricos das viagens da primeira etapa fornecidos pelo CPLEX. A variável decisão $\beta_{i,j,t,v,r}$ representa os valores das viagens da segunda etapa. Os valores de ν_e mostram quais embarcações foram utilizadas na primeira etapa e os valores de σ_v mostram quais veículos foram utilizados na segunda etapa. T_{ivr} indica o momento que uma carga chegou no cliente em determinada rota.

Os resultados geraram um banco de dados em planilhas do Excel e foi utilizado o programa *Microsoft PowerBI* para representar graficamente os dados. O roteamento foi desenhado no programa Power Point para melhor entendimento dos resultados numéricos de forma esquemática.

5.1 INSTÂNCIAS DE TESTE

As instâncias de teste foram criadas com o intuito de avaliar se a função objetivo e as restrições do modelo representam de forma satisfatória o problema de transporte descrito no Capítulo 3, analisar a distribuição das rotas da primeira e segunda etapa e avaliar o desempenho do modelo quanto ao tempo de execução e porte das instâncias.

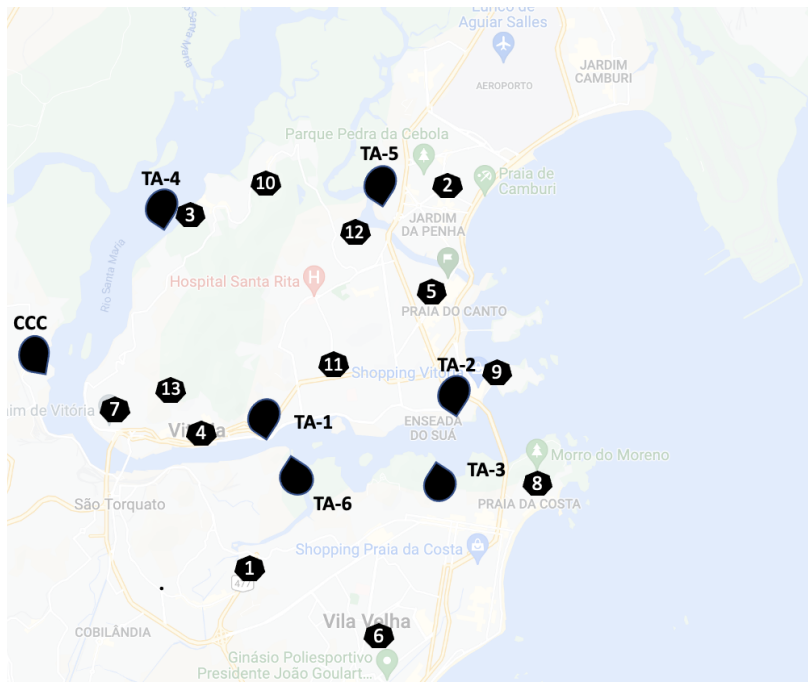
O sistema de transporte aquaviário a ser implantado pelo Estado, nas cidades de Vitória, Vila Velha e Cariacica, visa atender uma demanda de passageiros que possuem apenas duas pontes para atravessar o Canal de Vitória. O sistema contempla quatro Terminais Aquaviários (TAs) como parte de um projeto do Governo do Estado do Espírito Santo, que tem como foco a melhoria da mobilidade na região.

Será utilizada a infraestrutura dos TAs públicos de passageiros para receberem embarcações marítimas de cargas deste operador logístico. Posteriormente, as cargas serão distribuídas de cada TA até o cliente final a partir da integração do sistema com o transporte terrestre. Esta iniciativa tem como objetivo reduzir a quantidade de veículos que atendem demandas de entrega da região, minimizar os custos de transporte do operador logístico e gerar receita alternativa para o Estado com o uso da infraestrutura dos terminais aquaviários.

O terminal aquaviário definido como Centro de Consolidação de Carga (CCC) para ser o ponto de carregamento para todas as instâncias é o TA – Porto Santana, mais especificamente, localizado em Cariacica. Os TAs de descarga são: TA – Centro, TA – Praça do Papa e TA – Prainha. Esses terminais estão localizados ao longo do Canal de Vitória, a via é navegável por grandes navios que abastecem o Porto de Vitória.

A primeira etapa possui uma frota com diferentes tipos de embarcações marítimas que se deslocam entre o Centro de Consolidação de Cargas (CCC) e TAs. A segunda etapa considera uma frota com diferentes tipos de veículos terrestres (bicicletas e motocicletas) que iniciam a rota em um TA para distribuir as cargas até os clientes finais. A localização dos TAs é conhecida, e a capacidade é delimitada pelo tamanho do TA proposto pelo Governo do Estado para o transporte de passageiros.

Figura 9 - Esquema dos TAs e clientes (13 clientes)



Fonte: da Autora.

As distâncias entre os TAs obtidas com a ferramenta do *Google Earth*. Por se tratar de distâncias de até 20 quilômetros, não foi necessário utilizar de ferramentas náuticas para adquirir tais medidas. A Tabela 2 apresenta a matriz de distâncias entre o Centro de Consolidação de Carga (CCC) e Terminais Aquaviários (TAs).

Tabela 2 - Matriz de distâncias entre TAs em quilômetros

| | Porto Santana (CCC) | Centro (TA-1) | Praça do Papa (TA-2) | Prainha (TA-3) | Ilha das Caieiras (TA-4) | Ufes (TA-5) | Ilha das Flores (TA-6) |
|--------------------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------|--------------------------|-------------|------------------------|
| Porto Santana (CCC) | 0,0 | 4,11 | 8,46 | 8,67 | 3,91 | 11,21 | 5,30 |
| Centro (TA-1) | 4,11 | 0,0 | 4,23 | 4,66 | 7,75 | 14,97 | 1,40 |
| Praça do Papa (TA-2) | 8,46 | 4,23 | 0,0 | 1,02 | 12,06 | 19,14 | 2,91 |
| Prainha (TA-3) | 8,67 | 4,66 | 1,02 | 0,0 | 12,35 | 19,44 | 3,14 |
| Ilha das Caieiras (TA-4) | 3,91 | 7,75 | 12,06 | 12,35 | 0,0 | 7,46 | 8,52 |
| Ufes (TA-5) | 11,21 | 14,97 | 19,14 | 19,44 | 7,46 | 0,0 | 16,51 |
| Ilha das Flores (TA-6) | 5,30 | 1,40 | 2,91 | 3,14 | 8,52 | 16,51 | 0,0 |

Fonte: *Google Earth* (2022).

Duas embarcações foram consideradas. A Embarcação 1 é de pequeno porte (PP) e é uma embarcação que possui uma capacidade de 300 kg de carregamento. A Embarcação 2 foi denominada de grande porte (GP) e sua capacidade é de 850 kg. Os custos de transporte foram considerados de maneira simplificada, pois não é escopo do trabalho uma análise detalhada de custos. Para cada embarcação, foi estipulado um custo fixo diário que é praticado na região e um custo por quilômetro navegado, relacionado ao consumo médio de combustível em viagem.

Para as embarcações de pequeno porte (PP), foram consideradas uma velocidade média de 25 km/h, um custo fixo diário de R\$ 322,00 e o custo por quilômetro percorrido foi de R\$ 7,44. Para as embarcações de grande porte (GP), foram consideradas uma velocidade média de 18 km/h, um custo fixo diário de R\$ 660,00 e o custo por quilômetro percorrido foi de R\$ 12,32.

Como a frota terrestre é composta por bicicletas e motocicletas, como por exemplo na Figura 10, foram avaliadas cargas transportadas coerentes com a frota terrestre. Valores aleatórios de cargas, variando de 1 Kg até 22 Kg definiram as demandas dos clientes. Foram consideradas para as bicicletas uma velocidade média de 7,0 km/h e para o custo ao utilizar um veículo e o custo do quilometro rodado, R\$ 22,00 e R\$ 1,76, respectivamente. Para as motocicletas, foram consideradas uma velocidade média de 35 km/h e o para o custo ao utilizar um veículo e o custo do quilometro rodado, R\$ 107,00 e R\$ 2,69, respectivamente.

Figura 10 - Transporte de carga via modo terrestre



Fonte: Pling Transport (SUÉCIA, 2017).



Fonte: ICbras Soluções Industriais (2022).

Metade das instâncias retratam o cenário atual, que possui três TAs, e a outra metade retrata o cenário de uma possível expansão futura acrescentando a quantidade de terminais. Variou-se a quantidade de TAs, aumentando a quantidade para 6 (seis) TAs e foram mantidas as demandas dos mesmos clientes. Os novos TAs incluídos foram: TA – Caieiras (Vitória), TA – Ufes (Vitória) e TA – Flores (Vila Velha). Desta forma foi possível comparar os cenários para averiguar se a localização dos atuais TAs atendem a demanda da região de forma satisfatória ou não.

A Tabela 3 resume as características das instâncias de teste. Na Tabela 4, G1 representa as 20 instâncias do Grupo 1. Nota-se que o número de variáveis cresce significativamente quando se aumenta o número de nós no conjunto $V1$ e $V2$ e mais ainda quando se aumenta o número de rotas no conjunto R .

Tabela 3 - Características das instâncias de teste

| I | Nº TAs | Nº Cliente | Nº Rotas | Frota Heterogênea | Restrição de Acesso | Múltiplas Viagens |
|----|--------|------------|----------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 1A | 3 | 6 | 3 | X | | X |
| 1B | 6 | 6 | 3 | X | | X |
| 2A | 3 | 10 | 2 | X | | X |
| 2B | 3 | 10 | 2 | X | X | X |
| 2C | 3 | 10 | 3 | X | | X |
| 2D | 6 | 10 | 2 | X | | X |
| 2E | 6 | 10 | 2 | X | | X |
| 2F | 6 | 10 | 3 | X | X | X |
| 2G | 6 | 10 | 4 | X | X | X |
| 3A | 3 | 13 | 2 | X | | X |
| 3B | 3 | 13 | 4 | X | | X |
| 3C | 6 | 13 | 1 | X | | |
| 3D | 6 | 13 | 2 | X | | X |
| 3E | 6 | 13 | 3 | X | | X |
| 3F | 6 | 13 | 4 | X | | X |
| 4A | 3 | 15 | 1 | X | | |
| 4B | 3 | 15 | 2 | | | X |
| 4C | 3 | 15 | 1 | X | | X |
| 4D | 6 | 15 | 1 | X | | |
| 4E | 6 | 15 | 2 | | | X |
| 4F | 6 | 15 | 1 | X | | X |

Fonte: a autora.

As instâncias do Grupo 1 foram criadas para a análise de do sistema aquaviário integrado com o terrestre. Para todas as instâncias foram consideradas frotas heterogêneas na primeira e segunda etapa e múltiplas viagens com o objetivo de

testar as capacidades dos veículos (n_v) e observar como este parâmetro limita o sistema. São 6 (seis) clientes atendidos, uma demanda reduzida, que proporciona uma avaliação inicial do roteamento da primeira etapa (aquaviário) utilizando 3 TAs e, posteriormente, 6 TAs. A instância 1A é semelhante à 1B, o qual varia somente o parâmetro nt , referente à quantidade de TAs. As instâncias do Grupo 2 foram elaboradas com o objetivo de testar o modelo quanto às restrições de acesso e analisar o custo de diferentes tipos de frotas terrestres. Foi possível avaliar o roteamento da segunda etapa e comparar a frota definida pelo modelo matemático com a quantidade de quilômetros percorridos pelos veículos. Uma demanda de 10 (dez) clientes foi criada. As instâncias 2A, 2B e 2C possuem 3 (três) TAs e uma frota disponível de 1 bicicleta e 1 motocicleta para cada TA. Da mesma forma, as instancias 2D, 2E e 2F, as quais possuem 6 (seis) TAs, possuem 1 bicicleta e 1 motocicleta disponível para cada TA.

O Grupo 3 reúne instâncias criadas com o objetivo de testar as múltiplas viagens da segunda etapa (transporte terrestre). Variou-se o parâmetro de quantidade de rotas com o objetivo de comparar os valores apresentados na Função Objetivo (FO) e analisar o impacto das restrições de múltiplas viagens no custo final. Criou-se a demanda de 13 (treze) clientes e observou-se o desempenho da FO no cenário atual (3 TAs) e expandido (6 TAs). Cada TA possui uma frota de veículos disponível para realizar o roteamento, sendo estes 1 bicicleta e 1 motocicleta. O Grupo 4 contempla instâncias que testaram o modelo matemático em relação às restrições de acesso com uma demanda maior de clientes (15 clientes) para comparar as frotas definidas pelo roteamento das embarcações e dos veículos. Variou-se o parâmetro de quantidade de rotas, com objetivo de analisar o impacto das múltiplas viagens na segunda etapa. E, finalmente, variou-se também o parâmetro de quantidade de TAs, como nos grupos anteriores, para analisar o desempenho da FO e parcelas dos custos de transporte.

A Tabela 4 apresenta as instâncias criadas. Na A coluna 1 indica o grupo, a coluna 2 indica a instância, a coluna 3 indica a quantidade de satélites e a coluna 4 indica a quantidade de clientes. As colunas 5 e 6 são referentes ao transporte aquaviário, tipo e quantidade de embarcações. As colunas 7 e 8 são referentes ao transporte terrestre, tipo e quantidade de veículos disponíveis para o roteamento. A coluna 9 indica os valores da quantidade de rotas (múltiplas viagens) que os veículos podem realizar.

Tabela 4 - Instâncias de teste

| G | I | Qtde TAs | Qtde clientes | Aquaviário | | Terrestre | | |
|-----|----|-------------|------------------|------------|--------------------|-------------|------------------|---------------|
| | | | | 1ª Etapa | | 2ª Etapa | | |
| | | | | Tipo | Qtde embarcação | Tipo | Qtde veículos | Qtde rotas |
| I | 1A | 3 | 6 | PP | 1 | Bicicleta | 2 | 3 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |
| | 1B | 6 | 6 | PP | 1 | Bicicleta | 4 | 3 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |
| | 2A | | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 3 | |
| | 2B | 3 | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 3 | |
| | 2C | | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 3 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 3 | |
| II | 2D | | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 2E | 6 | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 2F | | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 3 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 2G | | 10 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 4 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 3A | 3 | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 3 | |
| | 3B | | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 4 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 3 | |
| III | 3C | | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 1 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 3D | 6 | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 3E | | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 3 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 3F | | 13 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 4 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 6 | |
| | 4A | | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 1 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |
| | 4B | 3 | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 2 |
| | | | | GP | 1 | | | |
| | 4C | | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 3 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |
| IV | 4D | | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 1 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |
| | 4E | 6 | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 2 |
| | | | | GP | 1 | | | |
| | 4F | | 15 | PP | 1 | Bicicleta | 6 | 2 |
| | | | | GP | 1 | Motocicleta | 2 | |

Fonte: a autora.

5.2 RESULTADOS E ANÁLISES

Esse capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático descrito no Capítulo 4 para as instâncias de teste propostas. As instâncias foram executadas por no máximo 96 horas, 345000 segundos.

Os resultados das instâncias do Grupo 1, 2, 3 e 4 destinado a análise do roteamento integrado do transporte aquaviário com o terrestre estão apresentados na Tabela 5. A primeira coluna Grupo indica os grupos e a segunda coluna indica as instâncias. A terceira coluna, FO, indica o valor encontrado para a Função Objetivo. As colunas UB, LB e Gap representam os valores de *Upper Bound*, *Lower Bound* e *Gap* obtidos pelo CPLEX, $Gap = \frac{UB-LB}{UB} * 100$. A sétima coluna indica o tempo de execução (TE) do CEPLEX. Obteve-se solução ótima para todas as instâncias dando gap igual à zero para todas elas.

Tabela 5 - Resultados do CPLEX para as instâncias dos grupos 1 a 3

| Grupo | Instância | FO (R\$) | UB (R\$) | LB (R\$) | TE (s) |
|-------|-----------|----------|----------|----------|---------|
| I | 1A | 802,43 | 802,43 | 802,43 | 11 |
| | 1B | 755,31 | 755,31 | 755,31 | 299 |
| | 2A | 796,39 | 796,39 | 796,39 | 88 |
| | 2B | 885,91 | 885,91 | 885,91 | 1174 |
| | 2C | 824,29 | 824,29 | 824,29 | 543 |
| II | 2D | 732,78 | 732,78 | 732,78 | 986 |
| | 2E | 667,67 | 667,67 | 667,67 | 654 |
| | 2F | 754,43 | 754,43 | 754,43 | 299 |
| | 2G | 844,62 | 844,62 | 844,62 | 654 |
| III | 3A | 821,36 | 821,36 | 821,36 | 734 |
| | 3B | 740,32 | 740,32 | 740,32 | 12.664 |
| | 3C | 1.242,86 | 1.242,86 | 1.242,86 | 1256 |
| | 3D | 841,59 | 841,59 | 841,59 | 442 |
| | 3E | 841,59 | 841,59 | 841,59 | 214.270 |
| | 3F | 762,28 | 762,28 | 762,28 | 54.338 |
| IV | 4A | 798,86 | 798,86 | 798,86 | 1174 |
| | 4B | 710,91 | 710,91 | 699,13 | 224 |
| | 4C | 810,06 | 810,06 | 810,06 | 65 |
| | 4D | 794,76 | 794,76 | 794,76 | 547 |
| | 4E | 667,87 | 667,87 | 667,87 | 654 |
| | 4F | 765,87 | 765,87 | 765,87 | 486 |

Fonte: a autora.

A Tabela 6 compara os custos entre todas as Instâncias. O menor valor de custo de transporte, foi encontrado nas instâncias 2E e 4E. Quando se observa os pontos em comum nestes dois cenários, nota-se que resultados do roteamento utilizaram

somente bicicletas nas viagens terrestres e as bicicletas usufruíram das múltiplas viagens. Isto fez com que o valor da FO decaísse em relação às outras instâncias. Outro ponto importante é a utilização de TAs que se encontram mais próximos, para aproximar os pontos de atracação e diminuir o tamanho da rota aquaviária, ou seja, diminuir a distância percorrida pela embarcação.

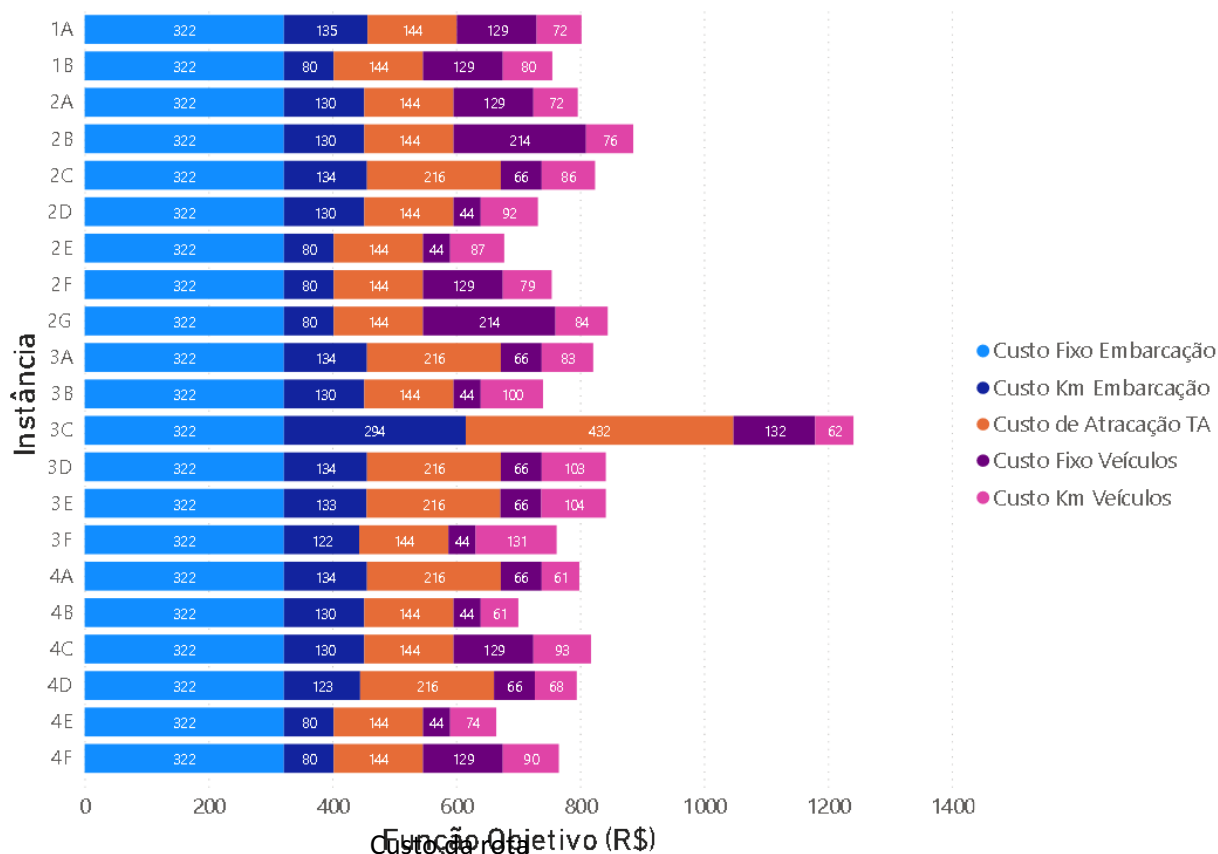
Tabela 6 - Custos das Instâncias

| Inst. | Custo Total (R\$) | Custo TAs (R\$) | Aquaviário Embarcações | | | Terrestre Veículos | | |
|-------|-------------------|-----------------|------------------------|------------------|----------|----------------------------------|------------------|----------------|
| | | | Frota | Utilização (R\$) | km (R\$) | Frota | Utilização (R\$) | km (R\$) |
| 1A | 802,44 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 135,04 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 40,20 32,20 |
| 1B | 755,31 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 35,90 43,98 |
| 2A | 796,38 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 129,75 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 25,20 46,43 |
| 2B | 885,91 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 129,75 | Motocicleta (2) | 214,00 | 76,15 |
| 2C | 824,29 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 134,14 | Bicicleta (3) | 66,00 | 86,15 |
| 2D | 732,78 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 129,85 | Bicicleta (2) | 44,00 | 92,33 |
| 2E | 667,67 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Bicicleta (2) | 44,00 | 87,24 |
| 2F | 754,43 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 32,45 46,43 |
| 2G | 844,62 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Motocicleta (2) | 214,00 | 84,28 |
| 3A | 821,36 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 134,12 | Bicicleta (3) | 66,00 | 83,16 |
| 3B | 740,32 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 144,00 | Bicicleta (2) | 44,00 | 100,50 |
| 3C | 1.242,86 | 432,00 | PP (1) | 322,00 | 293,58 | Bicicleta (6) | 132,00 | 60,07 |
| 3D | 841,59 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 134,14 | Bicicleta (3) | 66,00 | 103,49 |
| 3E | 841,59 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 134,14 | Bicicleta (3) | 66,00 | 103,49 |
| 3F | 762,28 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 121,57 | Bicicleta (2) | 44,00 | 130,68 |
| 4A | 798,86 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 134,14 | Bicicleta (3) | 66,00 | 60,72 |
| 4B | 710,91 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 129,75 | Bicicleta (2) | 44,00 | 71,16 |
| 4C | 810,06 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 129,75 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 96,77 |
| 4D | 794,76 | 216,00 | PP (1) | 322,00 | 123,13 | Bicicleta (3) | 66,00 | 67,60 |
| 4E | 667,87 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Bicicleta (2) | 44,00 | 74,36 |
| 4F | 765,87 | 144,00 | PP (1) | 322,00 | 80,43 | Bicicleta (1) Motocicleta (1) | 22,00 107,00 | 27,58 62,86 |

Fonte: a autora.

Na Figura 11, os mesmos dados da tabela foram transformados em um gráfico de barras horizontais para facilitar a interpretação dos resultados. A soma dos custos de transportes refere-se à Função Objetivo (FO), cuja legenda encontra-se ao lado do gráfico.

Figura 11 - Esquema e gráfico geral



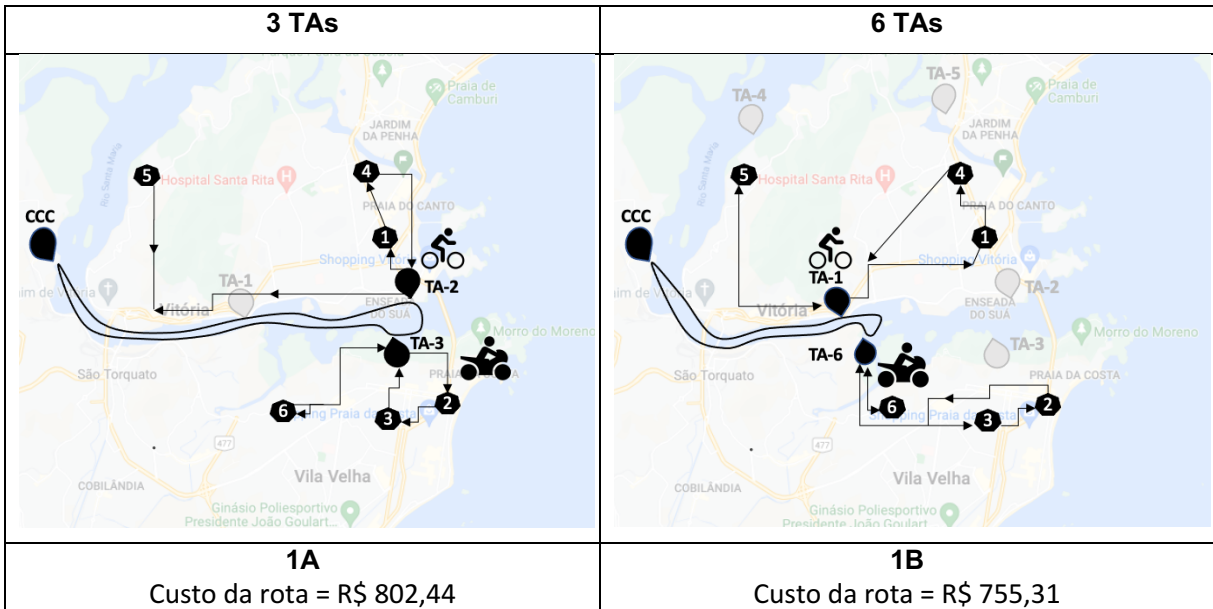
Fonte: a autora.

GRUPO 1

A Figura 12 mostra um esquema das viagens do Grupo 1, que contém as instâncias 1A e 1B. A instância 1A inicia sua viagem no CCC e a embarcação PP-1 abastece o TA-2 e TA-3. No TA-2, os clientes 1 e 4 são atendidos na primeira viagem da Bicicleta-2 e, posteriormente, o cliente 5 é atendido por esta mesma bicicleta em uma segunda viagem. Já do outro lado do canal, no TA-3, a Motocicleta-3 atende os clientes 2 e 3 na primeira viagem e atende o cliente 6 na segunda viagem. Isto aconteceu, pois a carga do cliente 6 só era comportada pela capacidade da motocicleta. Nota-se que o TA-1 não foi utilizado. A instância 1B contempla os mesmos clientes, porém possui 6 TAs disponíveis para o roteamento. O modelo utilizou o TA-1 com a Bicicleta-1 para fazer 2 viagens e atender os clientes 1 e 4, e posteriormente, o cliente 5. No TA-6 a

Motocicleta-6 atendeu o cliente 6 na sua primeira viagem e atendeu os clientes 3 e 2 na sua segunda viagem.

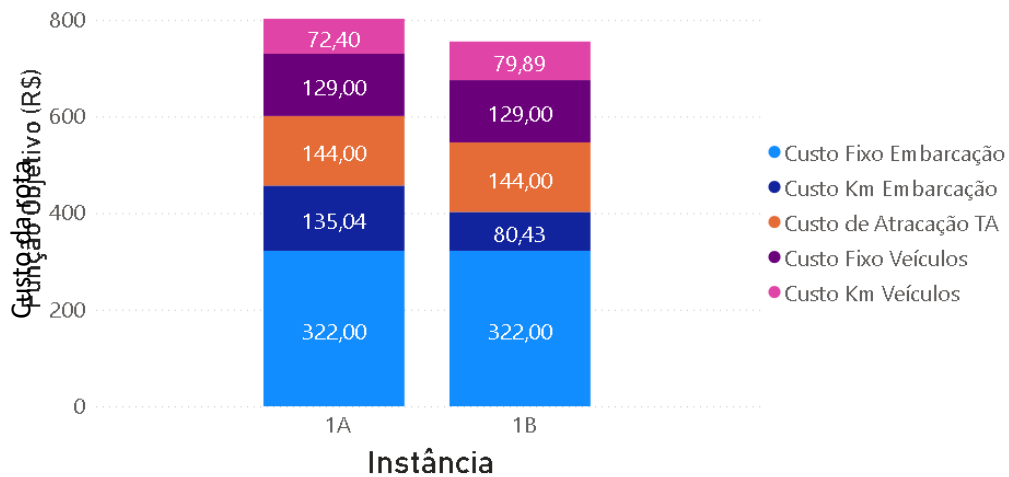
Figura 12 - Esquema e gráfico das viagens 1ª e 1B (Grupo 1)



Fonte: a autora.

Observa-se que foi no transporte aquaviário que a rota foi otimizada, partindo do CCC e abastecendo o TA-1 e TA-6. Isto ocasionou uma redução de 6% no custo total de transporte (ao comparar os valores de custo da rota). O custo da distância percorrida pela embarcação transporte aquaviário reduziu de R\$ 135,04 para R\$ 80,43 (Figura 13), representando uma redução de 41%. Porém houve acréscimo no custo do transporte terrestre em 10% sobre o valor da quilometragem percorrida pelos veículos.

Figura 13 - Gráfico dos custos do Grupo 1

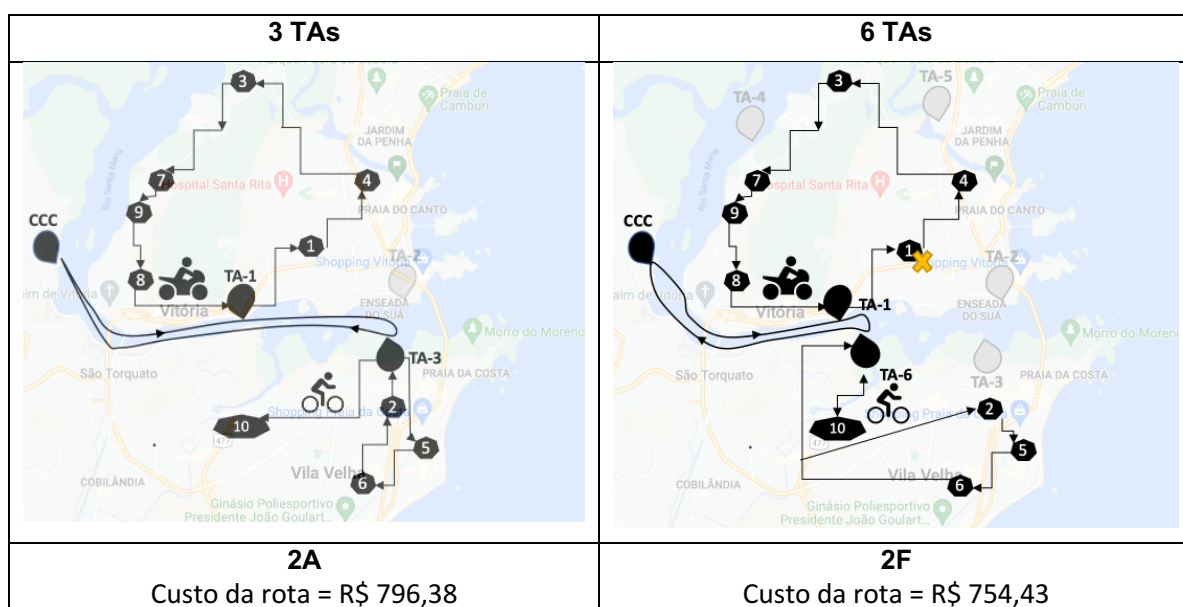


Fonte: a autora

GRUPO 2

A Figura 14 mostra um esquema das viagens do Grupo 2. Na Instância 2A, que contém 3 (três) TAs disponíveis para o roteamento, a embarcação PP-1 inicia sua rota no CCC e abastece o TA-1 e TA-2. O transporte terrestre do TA-1 é feito pela Motocicleta-1 que entrega para os clientes 1, 4, 3, 7, 9 e 8 em uma única viagem. No TA-3 a Bicicleta-3 entrega a carga dos clientes 5, 6 e 2 na primeira viagem e o cliente 10 na segunda viagem. Para a Instância 2F o modelo apresentou um roteamento com frota equivalente à Instância 2A (motocicleta e bicicleta), porém com 6 (seis) TAs disponíveis e restrição de acesso presente no Cliente 1 (representado pelo "x" laranja). Nesta comparação de instâncias, observou-se o mesmo acontecimento do grupo anterior, onde o modelo mostra que o transporte aquaviário busca a menor rota aquaviária. O TA-3 foi substituído pelo TA-6 e houve a redução de 5,3% no valor da função objetivo (custo da rota), sendo que o custo variável do aquaviário reduziu em 38%, referente à quilometragem percorrida pela embarcação. Entretanto, houve o aumento da quilometragem do veículo de 25,20 km (Bicicleta-3) para 32,45 km (Bicicleta-6) ao partir do TA-6.

Figura 14 - Esquema das viagens da Instância 2A e 2F (Grupo 2)

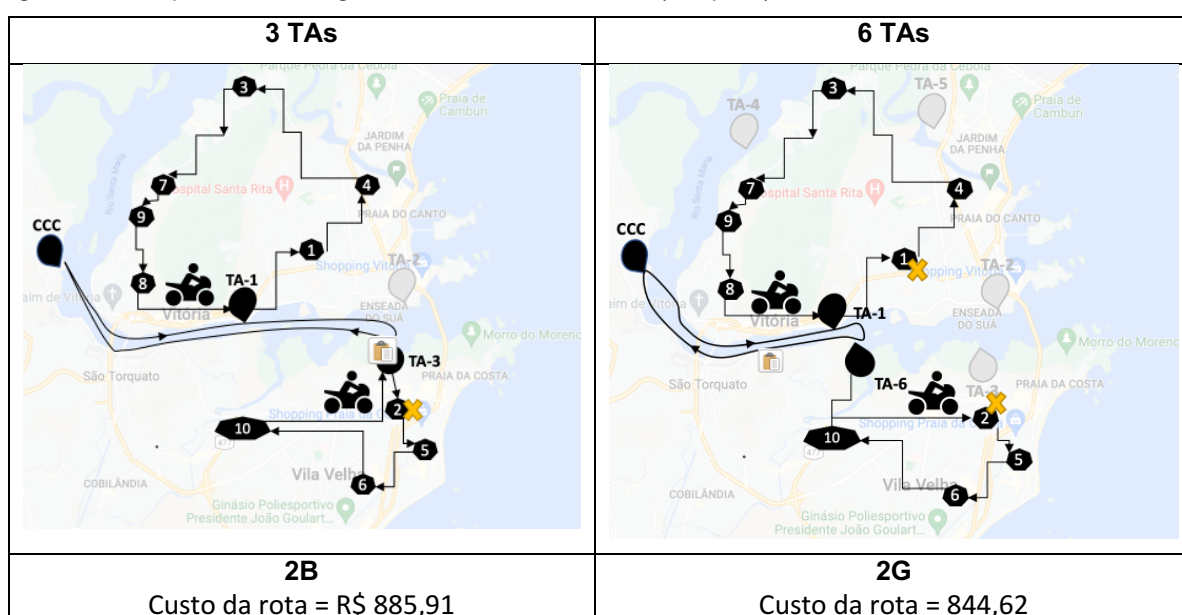


Fonte: a autora.

Para as instâncias 2B e 2G do Grupo 2, o CPLEX gerou resultados conforme a Figura 15. Observa-se que foram utilizadas 2 (duas) motocicletas para realizar as viagens terrestres por consequência de restrições de acesso nos clientes 1 e 2. A Instância 2B utilizou o TA-1 para atender os clientes 1, 4, 3, 7, 9 e 8 em uma única rota com a

Motocicleta-1. Também foi utilizado o TA-3 para atender os clientes 2, 5, 6 e 10 em uma única rota com a Motocicleta-2. A Instância 2G utilizou o TA-1 e TA-6, pelos mesmos motivos das instâncias anteriores e, as motocicletas realizaram a mesma rota (idem Instância 2B). A Instância 2G apresentou um resultado de FO inferior à Instância 2B, com redução de 4,7% no valor da FO. A viagem aquaviária obteve uma diminuição de 38%, passando de 1.774 m para 1.081 m. Entretanto a Motocicleta-6 (Instância 2G) percorreu 3.020 quilômetros a mais que a Motocicleta-3 da Instância 2B.

Figura 15 - Esquema das viagens da Instância 2B e 2G (Grupo 2)



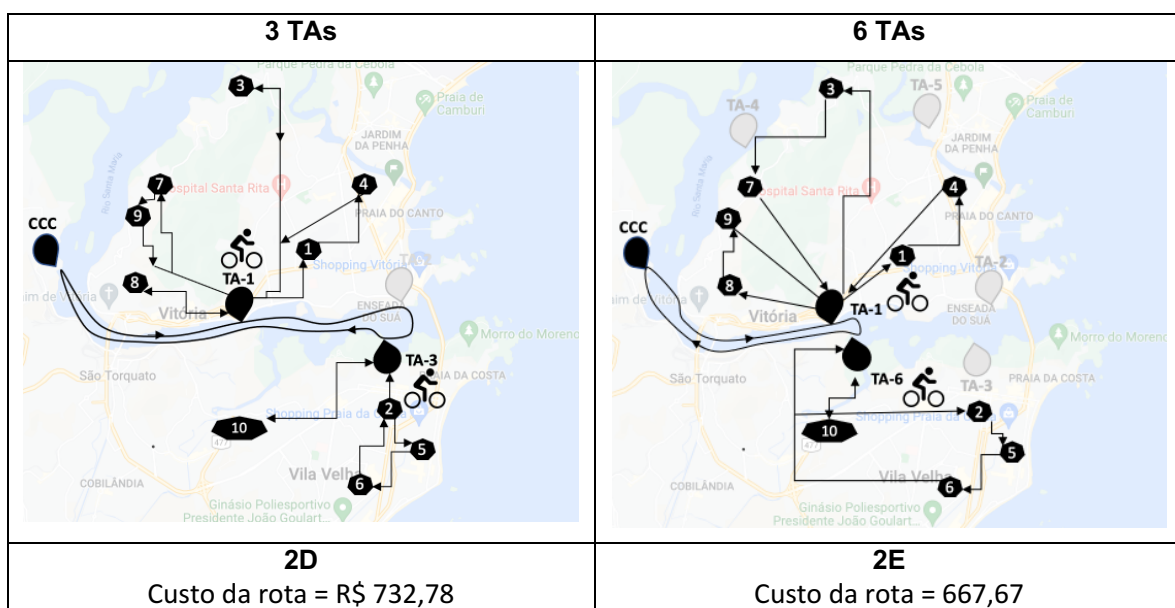
Fonte: a autora.

A Figura 16 mostra os resultados de forma esquemática para a Instância 2D e Instância 2E, as quais utilizaram 2 (duas) bicicletas para realizar o roteamento. Na primeira etapa da Instância 2D, a embarcação PP-1 utilizou o TA-1 e o TA-3. No TA-1 a Bicicleta-1 atendeu os clientes em 4 rotas. No TA-3 a Bicicleta-3 atendeu os clientes com somente 2 rotas. Já a Instância 2E, a embarcação PP-1 utilizou o TA-1 e TA-6. A Bicicleta-1 atendeu os clientes em 3 rotas distintas e, a Bicicleta-6 atendeu os clientes em 2 rotas.

Dentre as soluções para o Grupo 2, estas apresentaram os melhores resultados de custo da rota, visto que, além da locação das bicicletas (R\$ 22,00) serem aproximadamente sete vezes mais econômicas que o custo fixo das motocicletas (R\$ 107,00), o custo variável por quilômetro também é substancialmente menor, cerca de 34% menor. Desta forma pode-se comparar as frotas. Para o roteamento que possui

3 (três) TAs disponíveis (2B e 2D), houve uma redução de 17,3% no valor do custo da rota ao substituir a frota de motocicletas para bicicletas. Para o roteamento que possui 6 (seis) TAs disponíveis (2G e 2E), houve uma redução de 20,9% com a utilização da frota de bicicletas.

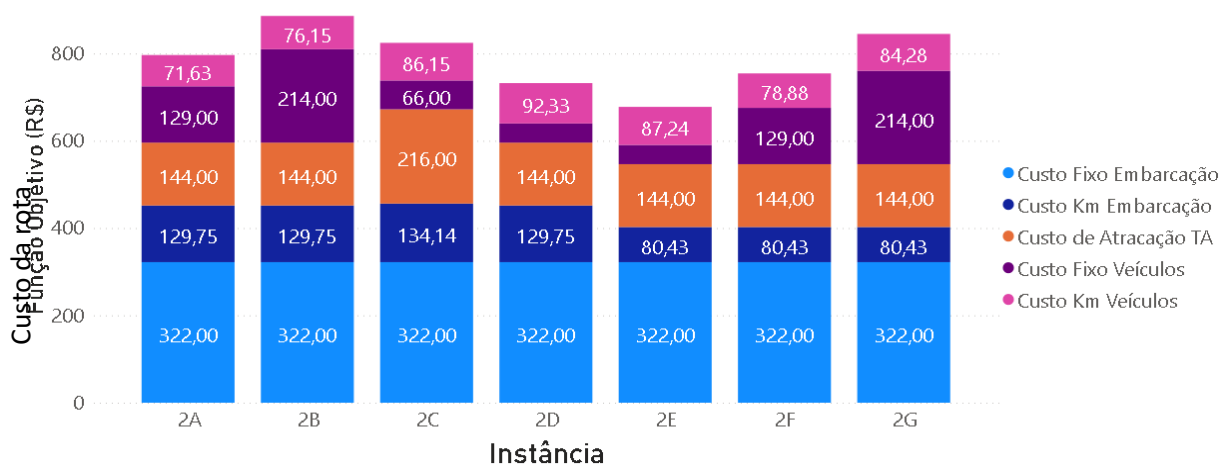
Figura 16 - Esquema das viagens da Instância 2D e 2E (Grupo 2)



Fonte: a autora.

Todas estas comparações de valores de custos de transportes podem ser observadas graficamente na Figura 17.

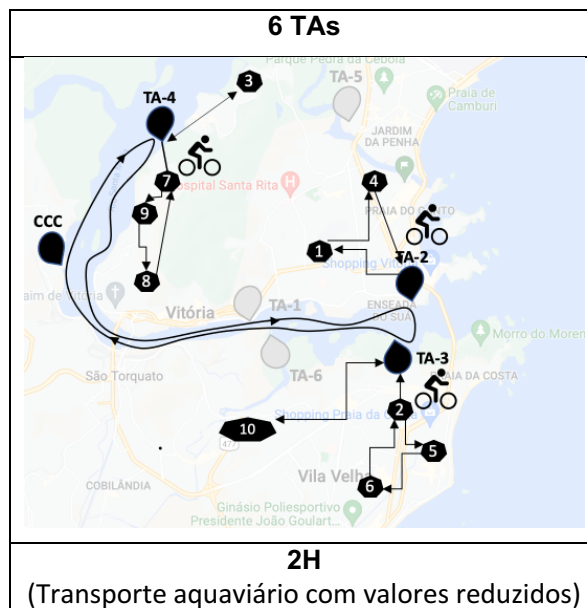
Figura 17 - Gráfico de Custos de Transporte do Grupo 2



Fonte: a autora.

Pode-se observar que alguns padrões se repetiram ao comparar os roteamentos com três TAs disponíveis e 6 TAs disponíveis. Por fim, foi possível criar uma instância de teste que saísse do padrão. Para isto foi necessário diminuir o custo por quilômetro das embarcações e custo de atracação nos terminais, para que o CPLEX mostrasse um cenário favorável ao transporte terrestre. Reduziu-se o custo variável por quilômetro da primeira etapa em 40% e reduziu-se o valor de atracação nos TAs em 50%. Na Figura 18, observa-se que a embarcação PP-1 sai do CCC e abastece o TA-4, TA-2 e TA-3. A rota aquaviária aumentou em relação às instâncias anteriores, porém foi possível utiliza três TAs e aproximar as rotas terrestres dos respectivos clientes. Ao comparar a Instância 2H com a Instância 2D, que também realizou 4 rotas, observa-se que houve uma redução de 12% na distância percorrida pelas bicicletas no lado da Ilha de Vitória.

Figura 18 - Esquema das viagens da Instância 2H (Grupo 2)



Fonte: a autora.

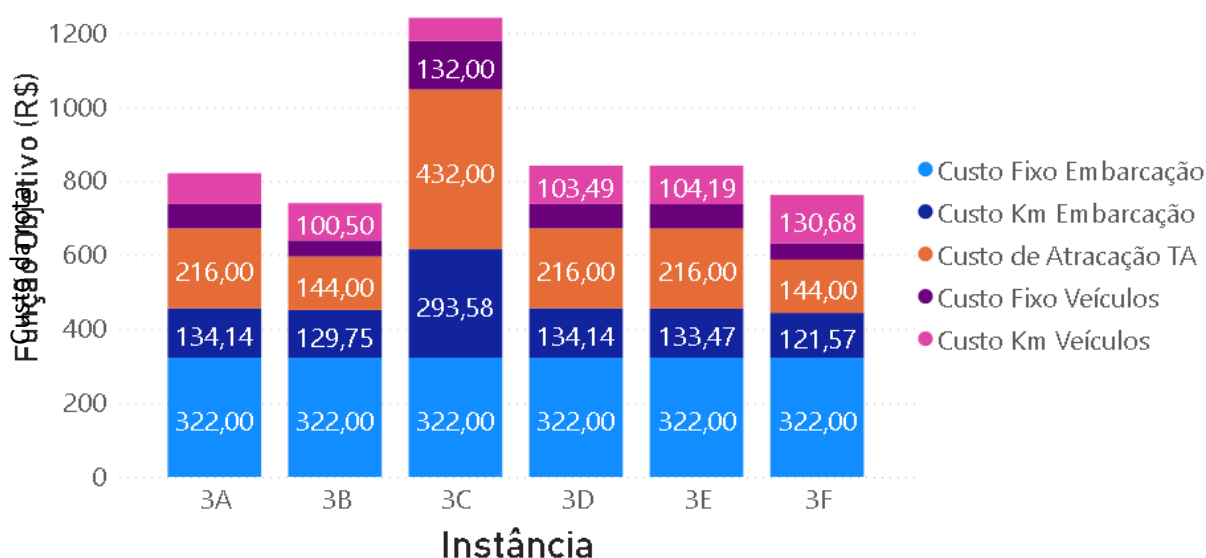
GRUPO 3

As análises do Grupo 3 dizem a respeito da alteração do parâmetro r , referente às múltiplas viagens que limitam os veículos terrestres. Primeiramente serão mostradas duas instâncias que possuem 3 TAs disponíveis e, posteriormente, mais quatro

instâncias que possuem 6 TAs disponíveis. Todas as instâncias do Grupo 3 possuem 13 clientes e mesma disponibilidade de uma bicicleta para cada terminal aquaviário.

Os valores de custos de transportes podem ser observados graficamente na Figura 19.

Figura 19 - Gráfico dos custos do Grupo 3

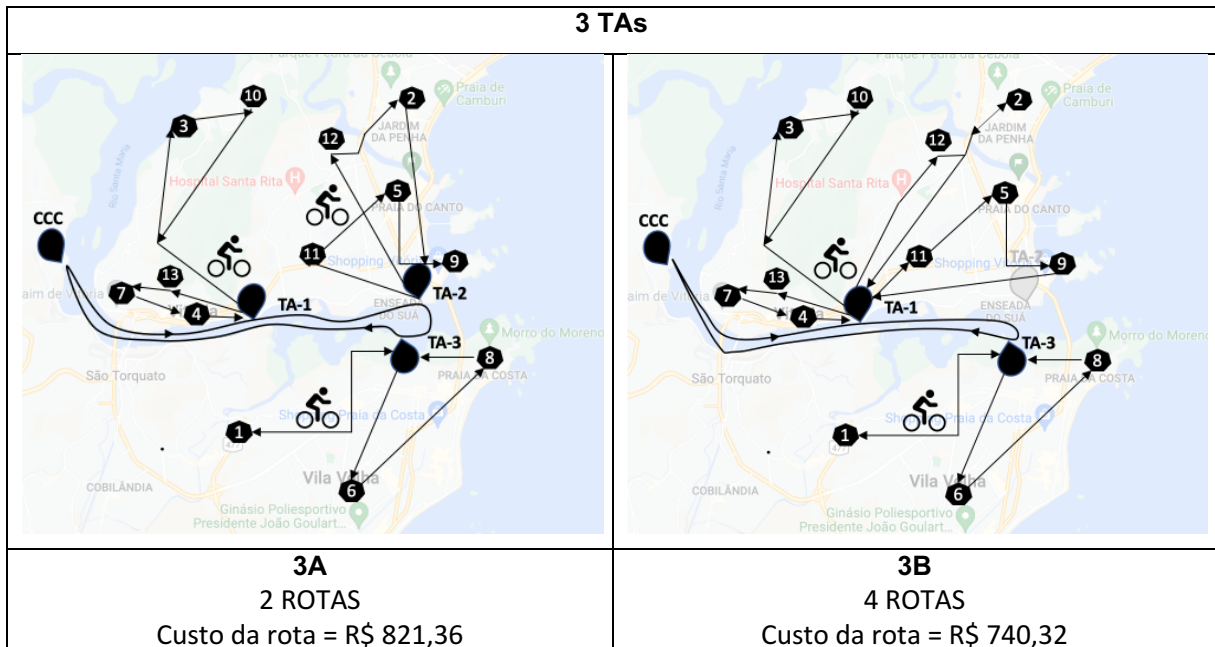


Fonte: a autora.

Para as instâncias 3A e 3B (Figura 20) verificou-se que à medida que se aumenta a quantidade de rotas disponíveis para os veículos, menor é o valor do custo da rota. Isto ocorre por conta da redução do valor fixo dos veículos e redução nos custos de atracação das embarcações, visto que o modelo busca realizar o mínimo de atracações. Entretanto observou-se o aumento do custo variável dos veículos, em detrimento do aumento da quilometragem percorrida pelos veículos. Na Instância 3A, a embarcação PP-1 atendeu o TA-1, TA-2 e TA-3. A Bicicleta-1 atendeu os clientes 13, 7 e 4, e posteriormente os clientes 3 e 10. A Bicicleta-2 atendeu os clientes 12 e 2, e posteriormente os clientes 11, 5 e 9. A Bicicleta-3 atendeu os clientes 6 e 8, e posteriormente o cliente 1. Na instância 3B a embarcação PP-1 atendeu o TA-1 e TA-3. A Bicicleta-1 em sua primeira viagem atendeu os clientes 13, 7 e 4, na segunda viagem os clientes 3 e 10, na terceira viagem os clientes 12 e 2, e finalmente na quarta viagem os clientes 11, 5 e 9. A Bicicleta-3 atendeu os clientes 6 e 8, e posteriormente

o cliente 1. Ou seja, o modelo fez com que a Bicicleta-1 absorvesse a demanda da Bicicleta-2, para obter a redução do valor do custo da rota.

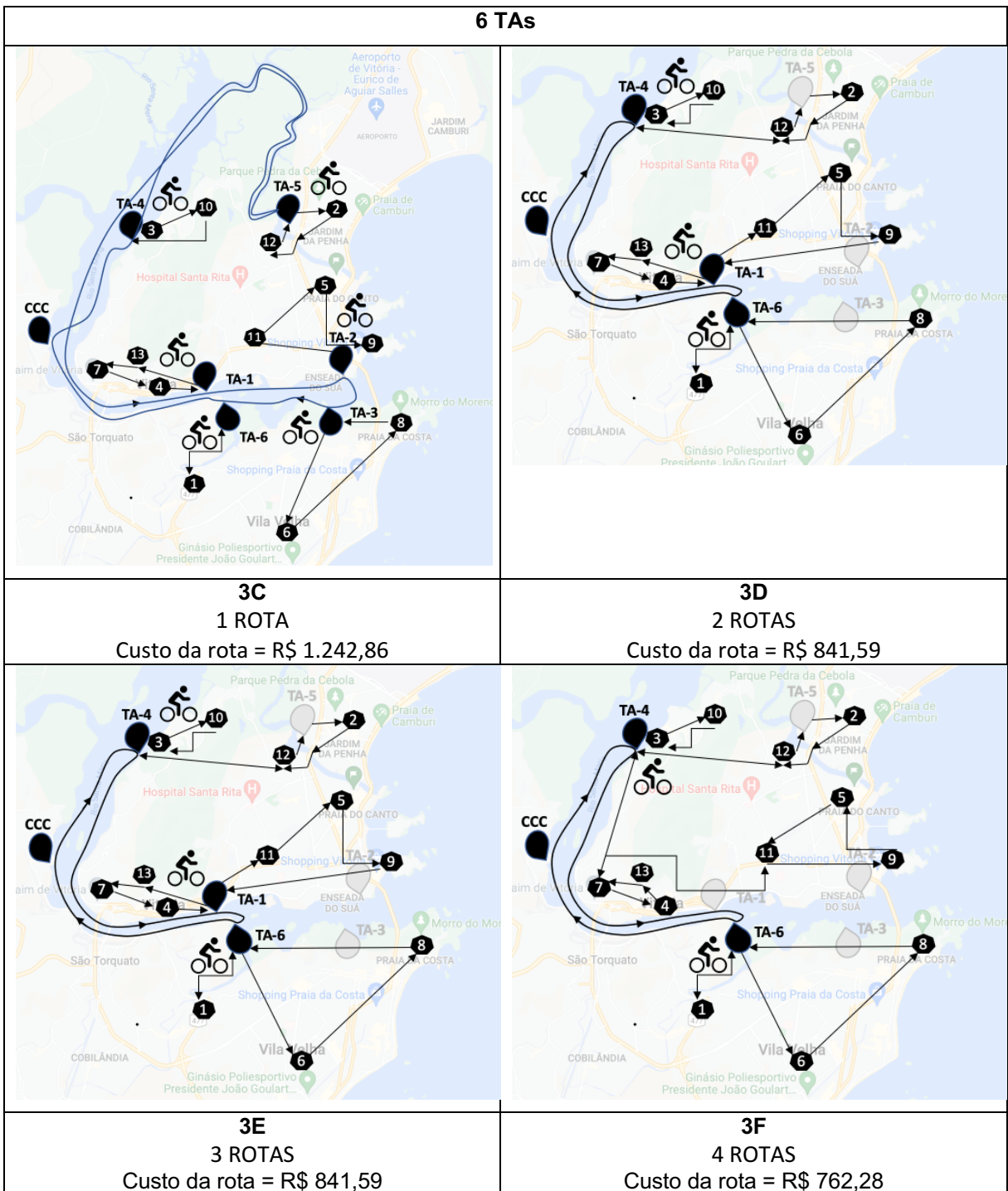
Figura 20 - Esquema das viagens da Instância 3A e 3B (Grupo 3)



Fonte: a autora.

Para o restante das instâncias do Grupo 3 (3C, 3D, 3E e 3F), todas estas com 6 (seis) TAs disponíveis, podemos respectivamente observar os cenários com 1, 2, 3 e 4 rotas como mostrado na Figura 21. A Instância 3C utilizou todos os seis TAs para conseguir atender os clientes e obteve-se o maior valor de custo de rota dentre todas as instâncias. Portanto, deve-se trabalhar as rotas em conjunto, e não simplesmente alocar a carga no ponto mais próximo de transbordo (TA). O fator que mais contribuiu para este aumento expressivo da FO foi a distância percorrida pela embarcação. As instâncias 3D e 3E foram idênticas. A embarcação PP-1 abasteceu o TA-4, TA-1 e TA-6. Houve a necessidade de utilizar 3 (três) bicicletas para atender todos os clientes, e cada bicicleta realizou 2 (duas) viagens. A Instância 3F contemplou o parâmetro $r = 4$, e uma única bicicleta absorveu a demanda do lado de Vitória. Desta forma, a embarcação PP-1 abasteceu o TA-4 e TA-6 e cada um deste utilizou uma bicicleta para atender seus respectivos clientes. A Bicicleta-4 atendeu os clientes 3 e 10 na primeira viagem, os clientes 12 e 2 na segunda viagem, os clientes 11, 9 e 5 na terceira viagem e finalmente, os clientes 7, 4 e 13 na quarta viagem. A Bicicleta-6 atendeu o cliente 1 na primeira viagem e os clientes 6 e 8 na segunda viagem.

Figura 21 - Esquema das viagens da Instância 3C, 3D, 3E e 3F (Grupo 3)



Fonte: a autora.

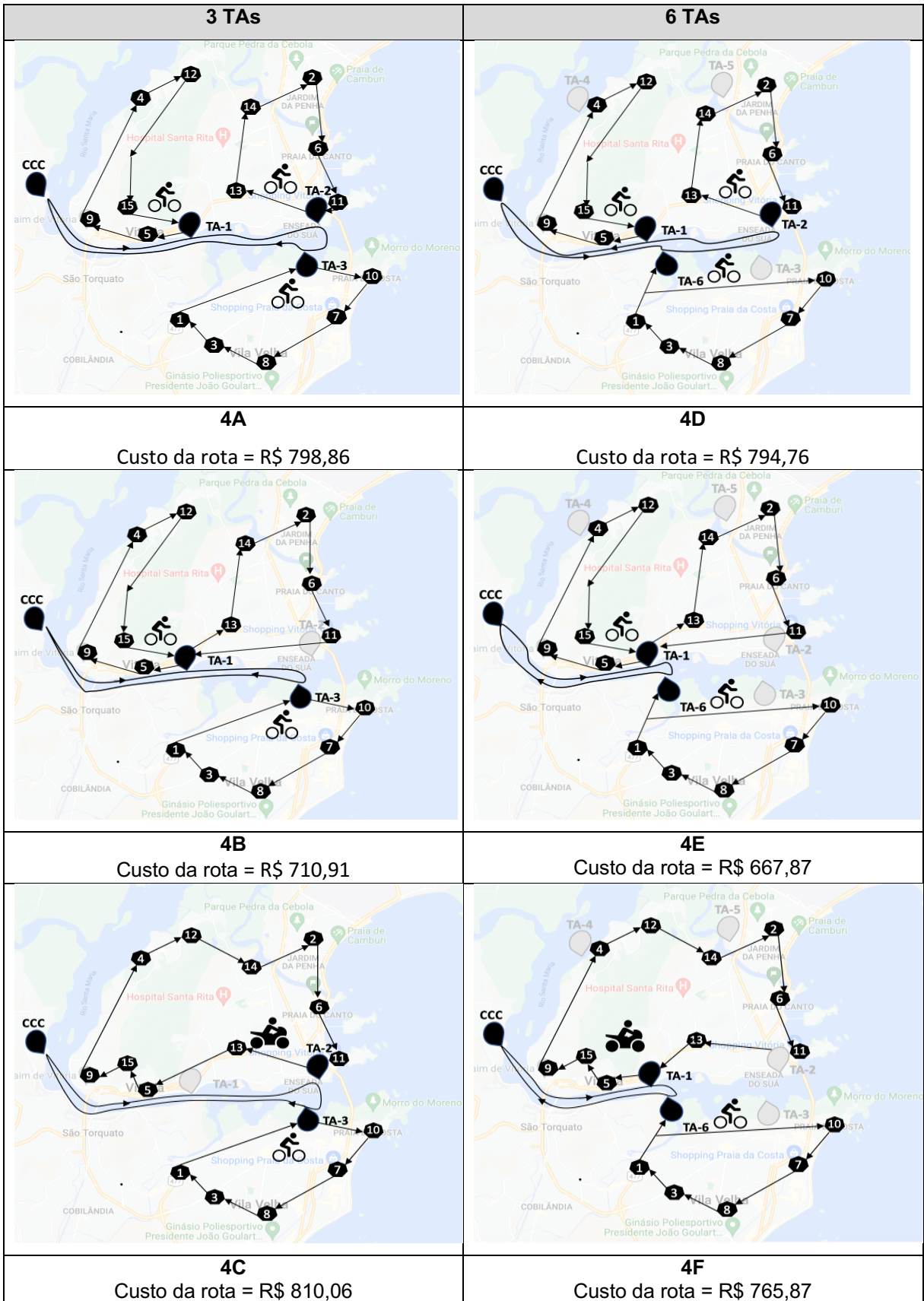
GRUPO 4

O Grupo 4 representa o roteamento de 15 clientes, conforme mostra a Figura 22. As instâncias 2A, 2B e 2C possuem 3 (três) terminais aquaviários disponíveis. Já as instâncias 2D, 2E e 2F possuem 6 terminais aquaviários disponíveis para o roteamento das embarcações. No transporte terrestre foi possível fazer um paralelo e comparar as instâncias 2A com 2D (frota de 3 bicicletas), 2B com 2E (frota de 2 bicicletas) e 2C com 2F (frota de 1 motocicleta e 1 bicicleta).

A Instância 4A foi testada somente com uma rota, e o modelo apresentou uma solução que utilizou todos os TAs. No TA-1 a Bicicleta-1 atendeu os clientes 5, 9, 4, 12 e 15, No TA-2 a Bicicleta-2 atendeu os clientes 13, 14, 2, 6 e 11. No TA-3 a Bicicleta-3 atendeu os clientes 10, 7, 8, 3 e 1. Conforme expande-se para 6 TAs (Instância 4D), o modelo transfere a carga do TA-3 para o TA-6 e mantém as rotas para o TA-1 e TA-2. No TA-6 a Bicicleta-6 também atende os clientes 10, 7, 8, 3 e 1. As Funções Objetivo das instâncias 4A e 4D obtiveram um resultado muito próximo, com diferença de apenas R\$ 4,10.

Para os roteamentos que utilizaram apenas 2 bicicletas, observou-se um decréscimo da FO de 11% (entre as instâncias 4A para 4B) e um decréscimo de 16% (entre as instâncias 4D para 4E). O motivo desta redução foi a introdução das múltiplas viagens, ou seja, $r = 2$. Além disto, a Instância 4E foi mais econômica deste grupo, pois não houve atracação no TA-2 e a viagem da embarcação PP-1 foi menor dentre todas as viagens. As instâncias 4C e 4F utilizaram 1 motocicleta e 1 bicicleta no roteamento.

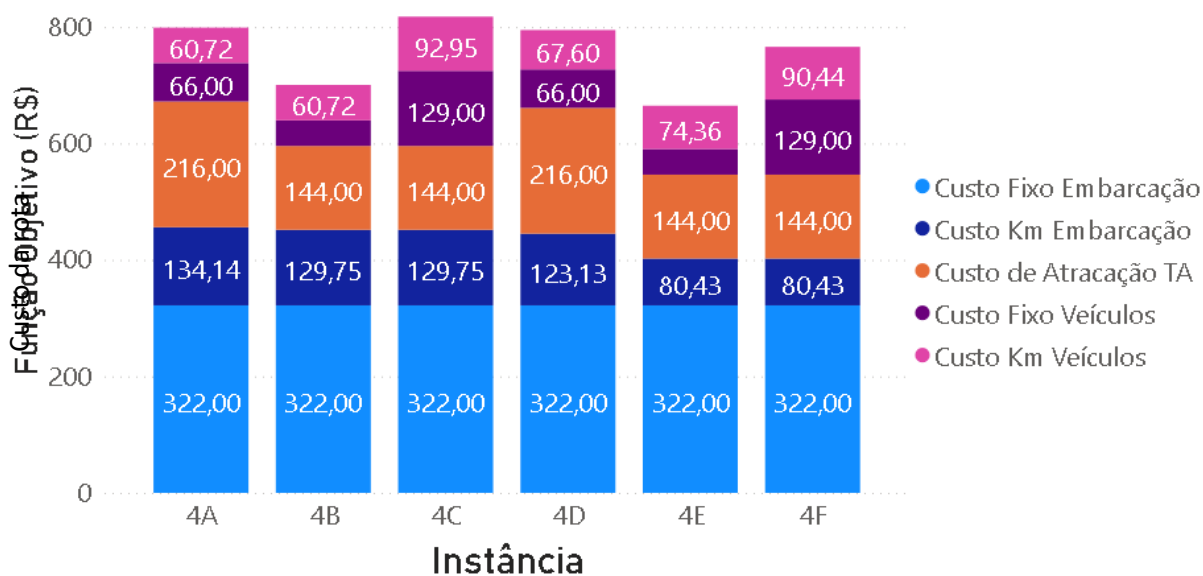
Figura 22 - Esquema das viagens da Instância 4A, 4B, 4C, 4D, 4E e 4F (Grupo 4)



Fonte: a autora.

Todas estas comparações de valores de custos de transportes podem ser observadas graficamente na Figura 23.

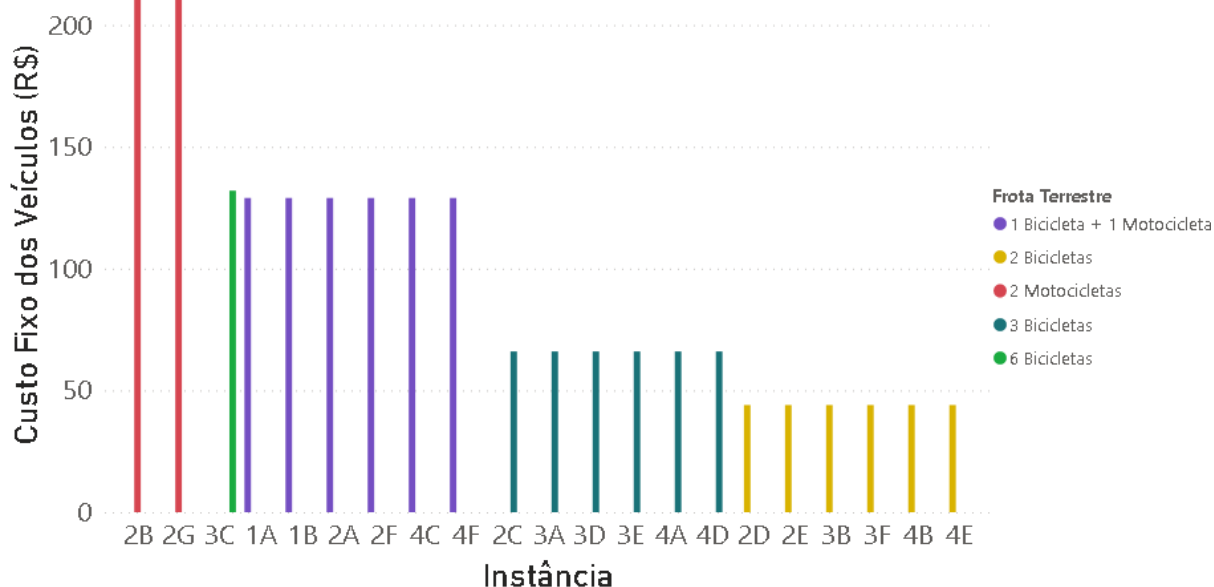
Figura 23 - Gráfico dos custos do Grupo 4



Fonte: a autora.

Como citado anteriormente, as instâncias 4B e 4E obtiveram os melhores valores no desempenho financeiro. Isto se deve ao fato de utilizarem múltiplas viagens e bicicletas nas viagens terrestres. Como nos outros grupos, o modelo busca otimizar a rota das embarcações, por terem um valor agregado superior ao terrestre, principalmente pelo custo por quilômetro das embarcações. Na Figura 24, tem-se um gráfico que representa o custo fixo da frota terrestre de cada instância. Sempre faz-se necessário utilizar no mínimo 2 veículos, pois cada um é alocado em lados opostos do canal. Portanto, a frota mais onerosa apresentou-se com o uso de 2 motocicletas (2B e 2G) e a mais econômica utilizou 2 bicicletas (2B, 2E, 3B, 3F, 4B e 4F).

Figura 24 - Custo de frotas terrestres



Fonte: a autora.

Foram testadas várias instâncias e o modelo matemático proposto atendeu de forma satisfatória. Os resultados mostraram que é possível realizar as rotas e realizar análises comparativas entre os diferentes cenários. As instâncias testadas utilizaram dados reais de distância e localização dos terminais aquaviários. Esta solução pode ser aplicada a qualquer cidade que possui ligações aquaviárias com o intuito de criar uma estratégia de distribuição de cargas em duas etapas ao integrar o transporte aquaviário com o terrestre.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação tratou do problema de planejamento das rotas do transporte urbano de cargas integrando o modo aquaviário com o terrestre. Para cidades que possuem ligações aquaviárias disponíveis esta solução alternativa pode ser explorada de forma sustentável e colaborativa à mobilidade urbana. Deve-se entender que tipo de frota melhor atende esta demanda, assim como planejar as rotas de entrega afim de minimizar os custos de transportes. O conceito deste trabalho é inovador, por considerar a integração do modo aquaviário e terrestre para o transporte urbano de carga.

Foi proposto um modelo matemático inspirado no 2E-CVRP, o qual previu embarcações realizando viagens na primeira etapa de transporte e veículos na segunda etapa de transporte. Para o planejamento das viagens a função objetivo visou minimizar os custos com frota, distância percorrida e atracções. O modelo proposto considera frota heterogênea nas duas etapas e janela de tempo, múltiplas viagens e restrição de acesso na segunda etapa.

Os resultados dos testes realizados através do *solver* CPLEX demonstraram que o modelo é capaz de representar de forma satisfatória o problema em questão e com as informações extraídas do *software* foi possível criar gráficos e gerar informação pertinente para fazer análises.

Pode-se concluir que o modelo encontra melhores resultados nas rotas aquaviárias quando possui maior quantidade de Terminais Aquaviários (TAs) disponíveis para o roteamento, reduzindo em até 40% o custo variável do transporte aquaviário. O planejamento das viagens mostrou que os cenários mais econômicos utilizaram frotas terrestres contendo somente bicicletas, e estas tiveram um desempenho melhor quando planejadas com múltiplas viagens.

Como a proporção dos custos por quilometragem das embarcações é aproximadamente seis vezes maior que o terrestre, o modelo apresenta soluções que tendem a diminuir o tamanho das rotas aquaviárias e por consequência os TAs de

atracação nem sempre são os mais próximos dos clientes. Isto gera um efeito de aumentar as rotas terrestres, porém mesmo assim apresenta valores de FO inferiores.

Obteve-se solução ótima para instâncias com até 15 clientes e 4 rotas terrestres (múltiplas viagens). Não se obteve a solução ótima com instâncias maiores que 15 clientes. Com isto, sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de um algoritmo computacional para resolver instâncias maiores. Outra sugestão é realizar uma análise econômico-financeiro do sistema integrado. Por fim, pode-se adaptar o modelo proposto para aplicação em outros tipos de carga e em outros modos de transporte, com outros tipos de frotas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ) - **Hidrovias no Brasil: perspectiva histórica, custos e institucionalidades**, p. 07, 2018.
- AWASTHI, A., ADETILOYE, T., e CRAINIC, T. G. (2016). **Collaboration partner selection for city logistics planning under municipal freight regulations**. Applied Mathematical Modelling, 40(1), 510-525, 2016.
- BABAGOLZADEH, M., SHRESTHA, A., ABBASI, B., ZHANG, S., ATEFI, R., & WOODHEAD. **A Sustainable open vehicle routing with release-time and time-window: A two-echelon distribution system**. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 571–576, 2018.
- BREUNIG, D., BALDACCI. **Two-echelon distribution with a single capacitated city hub**. Computers and Operations Research, v. 103, p. 198-210, 14 abr. 2019. ISSN 0305-0548, 2019.
- CÁRDENAS, I., BECKERS, J. e VANELSLANDER, T. (2017). **E-commerce last-mile in Belgium: Developing an external cost delivery index**. Research in transportation business & management, 24, 123-129.
- CÂMARA BRASILEIRA DE COMÉRCIO ELETRÔNICO MCC-ENET. **Índice de vendas online – Brasil**. Disponível em: <<https://www.mccenet.com.br/indice-de-vendas-online>>. Acesso em: 02 fevereiro 2021.
- 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. 2019.
- CRAINIC, T.G., RICCIARDI, N. e STORCHI, G. **Advanced freight transportation systems for congested urban areas**. Transportation Research, Part C, Vol. 12, No. 2, 119–137, 2004.
- CRAINIC, T.G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G.; TADEI, R. **GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem**. CIRRELT, 45, 2012.
- CUDA, R., GUASTARROBA, G., SPERANZA, M.G. **A survey on two-echelon routing problems**. Computers & Operations Research 55, 185–199, 2015.
- DARVISH, M., ARCHETTI, C., COELHO, L. C., & SPERANZA, M. G. **Flexible two-echelon location routing problem**. European Journal of Operational Research, 277(3), 1124–1136, 2019.
- DELLAERT, N., WOENSEL, T., CRAINIC, T., SARIDARQ, F. **A Multi-Commodity Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows: Model Formulations and Solution Approach**. CIRRELT-2019-43, 2019.

FIOROT, H., ROSA, R. **Planejamento de entregas em áreas urbanas considerando recarregamento intermediário, veículos com múltiplos carregamentos e janela de tempo.** Anais de congresso (ANPET), p. 07-15, 2019.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview>>. Acesso em: 20 março 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Informações Populacionais das Cidades Brasileiras.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html?utm_source=portal&utm_medium=popclock&utm_campaign=novo_popclock>. Acesso em 12 de fevereiro de 2021.

IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8. Using logical constraints. Disponível em: <<https://www.ibm.com/support/pages/cplex-optimization-studio-v128>>. Acesso em: 20 de novembro de 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA IPEA. **Hidroviás no Brasil: perspectiva histórica, custos e institucionalidades,** p. 07-12, 2014.

JACOBSEN, S.K., MADSEN, O.B. **A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem.** European Journal of Operational Research 5, 378–387, 1980.

JAEGERE, N. D., DEFRAEYE, M., e VAN NIEUWENHUYSE, I. **The vehicle routing problem: state of the art classification and review. Faculty of Economics and Business Research Report.** Faculty of Economics and Business Leuven, Belgium, 2014.

KANCHARLA, S., RAMADURAI, G. **Simulated Annealing Algorithm for Multi Depot Two Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem.** European Transport / Trasporti Europei. Issue 78, Paper n° 8, ISSN 1825-399, 2020.

LI, H., LIU, Y., JIAN, X., & LU, Y. **The two-echelon distribution system considering the real-time transshipment capacity varying.** Transportation Research Part B: Methodological, 110, 239–260, 2018.

LIU, T. **A branch-and-cut algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem with grouping constraints.** European Journal of Operational Research, v. 266, n. 2, p. 487-497, abr. 2017. ISSN 0377-2217, 2017.

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

MÜHLBAUER, D., FONTAINE, A. **A parallelised large neighbourhood search heuristic for the asymmetric two-echelon vehicle routing problem with swap containers for cargo-bicycles.** European Journal of Operational Research, -, n. Article in Press, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.034>, 2020.

SLUIJK, N., FLORIO, A. M., KINABLE, J., DELLAERT, N.P., VAN WOENSEL, T. **A Chance-Constrained Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands.** 2021

NOLZ, P., ABSI, N., CATTARUZZA, D., FAILLET, D. **Two-echelon distribution with a single capacitated city hub.** EURO Journal on Transportation and Logistics, v. 9, n. 3, p. Article 100015, ISSN 2192-4376, 2020.

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, 2012.

PLING TRANSPORT. **Pling Transport is a bicycle-based delivery company in Gothenburg.** Disponível em: < <https://swedishcleantech.com/companies/1951/pling-transport-cargo-bikes/>>. Acesso em 17 de janeiro de 2021.

SECRETARIA DE MOBILIDADE E INFRAESTRUTURA SEMOBI. **Governo publica edital para obras de construção dos pieres do aquaviário.** Disponível em: <<https://semobi.es.gov.br/Not%C3%ADcia/governo-publica-edital-para-obras-de-construcao-dos-pieres-do-aquaviario>>. Acesso em: 15 janeiro 2021.

SUSTAINABLE URBAN TRANSPORT PROJECT (SUTP). **Waterway projects.** Disponível em: < https://sutp.org/all-publications/?_sf_s=water>. Acesso em

VITORUGO, L., CALIMAN, R. **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 window.** Repositório UFES, p. 7-12, 2017.

WANG, K., SHAO, Y., & ZHOU, W. **Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service.** Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57, 262–276, 2017.