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

BIANCA PASSOS ARPINI

PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO

VITÓRIA
2015

BIANCA PASSOS ARPINI

PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Transportes.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

VITÓRIA
2015

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

Arpini, Bianca Passos, 1989-
A772p Planejamento da logística de suprimento de plataformas offshore por meio de um modelo matemático 2L-CVRP com frota heterogênea e equilíbrio náutico / Bianca Passos Arpini. – 2015.
164 f. : il.

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

1. Transporte marítimo. 2. Problema de roteamento de veículos. 3. Armazenamento e transporte de cargas. 4. Modelagem matemática. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PLANEJAMENTO DA LOGÍSTICA DE SUPRIMENTO DE PLATAFORMAS OFFSHORE POR MEIO DE UM MODELO MATEMÁTICO 2L-CVRP COM FROTA HETEROGÊNEA E EQUILÍBRIO NÁUTICO

Bianca Passos Arpini

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

Aprovada no dia **01 de junho de 2015** por:

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

Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES

Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo
Doutor em Engenharia Elétrica
Membro Externo - IFES

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Doutor em Computação Aplicada
Membro Externo – UFES/Alegre

Vitória – ES, Junho de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Denize e Moises pelo incentivo e apoio. À minha irmã Bruna pelo carinho e companheirismo tão importantes. À memória de meus avôs pelo exemplo de vida, amor e honestidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por se fazer presente em todos os momentos, contribuindo para a concretização desta etapa em minha vida.

Aos meus pais Denize e Moises e à minha irmã Bruna que sempre me incentivaram e torceram por mim. Obrigada pelo apoio incondicional e companheirismo nos momentos mais difíceis e pelo estímulo nas horas de desânimo e cansaço. Vocês são meus maiores amores e alicerces!

À minha família, pelo apoio, pela união nos momentos de tristeza e pela alegria nos momentos de descontração. Especialmente, ao meu tio Renato e aos meus primos Otacílio, Charles e Rafael, que foram minhas fontes de inspiração, exemplos e motivação para seguir na carreira acadêmica. A vocês minha admiração e respeito.

Ao meu orientador, Professor Rodrigo de Alvarenga Rosa, por acreditar em minha capacidade e compartilhar seus conhecimentos, estando sempre ao meu lado na busca pelas melhores soluções para o desenvolvimento desse trabalho. Obrigada pela parceria, pela paciência, pela amizade, pela dedicação e doação ao desenvolvimento da pesquisa e pelos ensinamentos que levarei para sempre.

Aos Professores Elcio Cassimiro Alves, Geraldo Regis Mauri e Leandro Colombi Resendo, pela disponibilidade e participação na banca examinadora dessa dissertação e contribuição com importantes sugestões e observações.

Aos funcionários do COMUT, Ana Maria de Matos Mariani e Cláudio França, por me ajudarem na busca dos artigos científicos necessários à construção da minha revisão da literatura. Ao secretário do colegiado, Júnior Corrêa, pelos ótimos momentos de convívio.

Aos amigos do PPGEC/UFES, pelas horas de estudo e de descontração compartilhadas. Em especial ao Vinícius Bermond e à Thiara Cezana pelo companheirismo e amizade. Ao José Geraldo Silva Costa por desenvolver macros em Excel que permitiram desenhar os resultados com maior rapidez.

À Petrobras por disponibilizar dados e informações que viabilizaram a realização do trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa durante o período de mestrado.

Muito Obrigada!

“A descoberta consiste em ver o que todo mundo viu e pensar o que ninguém pensou.”

Albert Szent-Györgyi

RESUMO

O petróleo é um importante recurso no mundo atual e sua exploração no Brasil se baseia, sobretudo, na exploração em águas profundas, para a qual são implantadas plataformas *offshore*. Como estas plataformas estão distantes da costa brasileira e isoladas, é fundamental planejar a logística de suprimento, que inclui, entre outros elementos, as embarcações de apoio *offshore*, as quais são responsáveis por abastecer as plataformas e constituem um recurso caro. Nos sistemas logísticos, é essencial planejar e gerenciar as atividades de transportes de cargas, pois os custos relativos ao transporte representam uma grande parcela dos custos logísticos totais. Portanto, no contexto analisado, é importante minimizar os custos de transporte por meio de um eficiente planejamento dos navios de suprimento. Nesse sentido, há dois aspectos centrais na gestão de distribuição logística: problemas de roteamento de veículos, usados para determinar a rota ótima, e problemas de carregamento, usados para definir a melhor maneira de carregar mercadorias dentro dos veículos utilizados no transporte. Visando a criação de rotas e a arrumação bidimensional de cargas, foi proposto na literatura o Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Restrições de Carregamento Bidimensional (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints* – 2L-CVRP). Esta dissertação tem por objetivo propor um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista baseado no 2L-CVRP aplicado ao planejamento da logística de suprimento de plataformas *offshore* para criar rotas considerando o equilíbrio náutico e a melhor arrumação das cargas no convés, denominado *Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (WB2L-HFVRP). Este modelo se diferencia por considerar frota heterogênea e utilizar uma função objetivo que visa minimizar o número de navios, a distância navegada e a diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos do navio. Testes em instâncias baseadas em dados reais da Petrobras foram feitos no CPLEX 12.6 e mostraram uma redução de até 25% em relação à distância real navegada.

Palavras-chave: 2L-CVRP. WB2L-HFVRP. Logística de Suprimento. Plataformas *Offshore*.

ABSTRACT

Oil is an important resource in today's world and its exploitation in Brazil is based mainly on deepwater exploration, for which offshore platforms are deployed. As these platforms are isolated and distant from the Brazilian coast, it is essential to plan the supply logistics, which includes, among other elements, the offshore support vessels, which are responsible for supplying the platforms and are an expensive resource. On logistics systems, is essential to plan and manage the activities of freight transport, because the transport costs represent a large portion of total logistics costs. Therefore, in the analyzed context, it is important to minimize transportation costs through efficient planning of the supply vessel. In this sense, there are two central aspects in the management of logistics distribution: Vehicle Routing Problems, used to determine the optimal route, and Loading Problems, used to define the best way of carrying goods in vehicles used for transport. Aiming to create routes and the two-dimensional storage of cargo, has been proposed in the literature the Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints (2L-CVRP). This essay aims to propose a mathematical model of Mixed Integer Linear Programming based on 2L-CVRP applied to planning the supply logistics of offshore platforms to create routes considering the nautical balance and better storage of cargo on deck, named Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (WB2L-HFVRP). This model differs from other models because it considers heterogeneous fleet and uses a objective function that aims to minimize the number of ships, sailed distance, and the difference between the weights distributed between the sides of the ship, the nautical balance. Tests on instances based on real data from Petrobras were made in CPLEX 12.6 and showed a reduction of up to 25% compared to the actual sailed distance.

Keywords: 2L-CVRP. WB2L-HFVRP. Supply Logistics. Offshore platforms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica de uma Rede de Transporte 26
Figura 2 - Grafo Orientado 26
Figura 3 - Grafo Misto 27
Figura 4 - Rede de transporte multiobjetivo e suas taxonomias 31
Figura 5 - Exemplo do 2L-CVRP do tipo 2|SO|L 47
Figura 6 - Superfície de carregamento do veículo: (a) 2|SR|L; (b) 2|UO|L; (c) 2|UR|L. 48
Figura 7 - Variantes do 2L-CVRP 68
Figura 8 - Distribuição de artigos que estudam apenas 1 categoria do 2L-CVRP 69
Figura 9 - Distribuição de artigos que estudam 2 categorias simultaneamente do 2L-CVRP . 69
Figura 10 - Distribuição de artigos que estudam 4 categorias do 2L-CVRP 70
Figura 11- Representação esquemática do fluxo de materiais e informações na cadeia de suprimento *offshore* da Petrobras 73
Figura 12 - PLSV 76
Figura 13 - WSV 76
Figura 14- PSV 77
Figura 15 - UT 78
Figura 16 - Categorias de Problemas de Roteamento de navios de apoio a plataformas *offshore* 80
Figura 17 - Fases da Metodologia de Pesquisa 105
Figura 18 - Fases da Metodologia de Pesquisa detalhadas 106
Figura 19 - Descrição do Problema 109
Figura 20- Classificação quanto ao tipo de variante do 2L-CVRP 111
Figura 21 - Etapas da PLIM 113
Figura 22 - Localização das principais bases de apoio offshore operadas pela Petrobras e delimitação das Bacias 114
Figura 23 - Mapa da localização relativa das plataformas da Bacia do ES e da CPVV 116
Figura 24 - Mapa da localização relativa de algumas plataformas da Bacia de Campos e do TAI 119
Figura 25 - Representação esquemática da superfície de carregamento no navio 128
Figura 26 - Representação gráfica das variáveis de posição das cargas 130
Figura 27 - Arrumação obtida para a instância 833R_1_E, com 13 cargas em um PSV4500 . 139
Figura 28 - Arrumação obtida para a instância 432R_2_C, com 30 cargas em um PSV3000 . 140

Figura 29 - Arrumação obtida para a instância 832T_1_E: a) Seis cargas em um PSV 1500; b) Sete cargas em um PSV3000 141
Figura 30 - Arrumação obtida para a instância 842R_1_C: a) 17 cargas em um PSV3000; b) 30 cargas em um PSV4000 141
Figura 31 - Arrumação obtida para a instância 842T_1_E: a) Oito cargas em um PSV1500; b) Oito cargas em um PSV1500; c) Oito cargas em um PSV3000; d) Oito cargas em um PSV4500 142
Figura 32 - Arrumação obtida para a instância 933R_1_C, com nove cargas em um PSV1500 143
Figura 33 - Arrumação obtida para a instância 1242T_1_C: a) Seis cargas em um PSV1500; b) Seis cargas em um PSV3000; c) Seis cargas em um PSV4500; d) Seis cargas em um PSV4500 144
Figura 34 - Arrumação obtida para a instância 1552T_1_C: a) Seis cargas em um PSV1500; b) Seis cargas em um PSV1500; c) Seis cargas em um PSV3000; d) Seis cargas em um PSV4500; e) Seis cargas em um PSV4500 145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Posicionamento georreferencial para a CPVV e as plataformas da Bacia do ES .. 115
Tabela 2 - Posicionamento georreferencial para o TAI e as plataformas de Campos 117
Tabela 3 - Características dos PSVs 120
Tabela 4 - Matriz de distâncias da Bacia do ES (Km) 121
Tabela 5 - Matriz de distâncias da Bacia de Campos (Km) 122
Tabela 6 - Atributos das cargas 125
Tabela 7 - Valores possíveis para os critérios na construção das instâncias 126
Tabela 8 - Conjunto de instâncias criadas 136
Tabela 9 - Resultados apresentados pelo CPLEX para as instâncias criadas 137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Taxonomia do VRP proposta por Eksioglu *et al.* (2009) (Tradução Livre)..... 32
Quadro 2- Resumo da revisão da literatura de 2L-CVRP..... 66
Quadro 3 - Resumo de Propriedades Operacionais dos Experimentos Computacionais..... 71
Quadro 4 - Resumo da Revisão da Literatura de Roteamento e Programação de PSVs 96
Quadro 5 - Escopo do Trabalho relativo ao Problema de Roteamento de PSVs 110

LISTA DE SIGLAS

2BPP – *Two-Dimensional Bin Packing Problem*

2L-CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints*

2L-CVRP-H – *Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints and Handling Costs*

2L-CVRPTW – *Two-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows*

2L-HFVRP – *Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*

2LPC-CVRP – *Two-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem with Partial Conflicts*

2L-PDP – *Two-Dimensional Pickup and Delivery Routing Problem with Loading Constraints*

2SPP – *Two-Dimensional Strip Packing Problem*

3L-CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints*

ABC – A*rtificial Bee Colony Algorithm*

ACO – *Ant Colony Optimization*

AHTS – *Anchor Handling and Tug Supply*

AI P&S – *Intelligence Planning & Scheduling*

ALNS – *Adaptive Large Neighbourhood Search*

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

B&B – *Branch-and-Bound*

B&C – *Branch-and-Cut*

B&P – *Branch-and-Price*

BFD – *Best Fit Decreasing Heuristic*

BFO – *Break-First-then-Optimum*

BFP – *Best-Fit Packing Heuristic*

BLDW – *Bottom Left Decreasing Width heuristic*

BLF – *Bottom-Left Fill*

BLF-L – *Bottom-Left Fill (L-axis)*

BLF-W – *Bottom-Left Fill (W-axis)*

C&P – *Cutting and Packing*

C&W – Clarke e Wright

CAV – C*onstructive Algorithm of Alvarez-Valdez*

CB – *Crewboat*

CPP – *Chinese Postman Problem*

CPVV – Companhia Portuária de Vila Velha

CVRP – *Capacitated Vehicle Routing Problem*

DA – *Deterministic Annealing*

DSV – *Diving Support Vessel*

DWD – *Dantzig-Wolfe Decomposition*

E&P – Exploração e Produção

EAM – Embarcações de Apoio Marítimo

EBN – Empresas Brasileiras de Navegação

EGLS – *Extended Guided Local Search*

EGTS – *Extended Guided Tabu Search*

ELS – *Evolutionary Local Search*

FC – *Floor-Ceiling*

FPSO – *Floating Production Storage Offloading*

GA – *Genetic Algorithms*

GENI – *Generalized Insertion Procedure*

GLS – *Guided Local Search*

GRASP – *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

GTS – *Guided Tabu Search*

HFVRP – *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*

IACM – Indicador de Atendimento da Carga Marítima

IEA – *International Energy Agency*

ILP – *Integer Linear Programming*

ILS – *Iterated Local Search*

KE – *Knowledge Engineering*

LB – *Lower Bounds*

LBFH – *Lowest Reference Line Best-Fit Heuristic*

LIFO – *Last in First Out*

LNS – *Large Neighbourhood Search*

LS – *Local Search*

MA – *Memetic Algorithms*

MAH – *Min Area heuristic*

MC-VRP – *Multi-Compartments Vehicle Routing Problem*

MFVH – *Max Fitness Value Heuristic*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

MIP – *Mixed Integer Programming*

MLH – *Multi-Level Extendible Hashing Scheme*

MP-VRP – *Multi-Pile Vehicle Routing Problem*

MS-BR – M*ultistart Biased-Randomized Algorithm*

MTP – M*aximum Touching Perimeter*

MTPNW – *Max Touching Perimeter No Walls heuristic*

MVRP – *Multitrip Vehicle Routing Problem*

NSGA –II – *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*

OSRV – *Oil Spill Response Vessel*

PDDL – *Planning Domain Definition Language*

PIH – *Parallel Insertion Heuristic*

PLSV – *Pipe Laying Support Vessel*

PNLIM – Programação Não Linear Inteira Mista

PRMP – *Promise Routing-Memory Packing*

PS – *Path Scanning*

PSV – *Platform Supply Vessel*

PSVPP – *Periodic Supply Vessel Planning Problem*

PSVRSP-RT – *Platform Supply Vessel Routing and Scheduling Problem with Refueling Tankers*

PVRP – *Periodic Vehicle Routing Problem*

RCM – *Randomized Clarke and Write*

RCPSP – *Resource Constrained Project Scheduling Problem*

RMP – *Restricted Master Problem*

RPP – *Rural Postman Problem*

RPS – *Randomized Path Scanning*

RSA – *Recursive Smoothing Algorithm*

RSV – *Research Supply Vessel*

RT – Requisição de Transporte

RTR – *Record-to-Record Travel*

S2L-CVRP – *Vehicle Routing with Stochastic Two-Dimensional Items*

SA – *Simulated Annealing*

SA_HLS – *Simulated Annealing with Heuristic Local Search*

SHF – S*helf Heuristic Filling Method*

SI1SIH – *Solomon I1 Sequential Insertion Heuristic*

SIH – S*equential Insertion Heuristic*

SMD – *Static Move Descriptor*

STL – *Standart Template Library Map*

SVRPPD – *Single Vessel Routing Problem with Pickups and Deliveries*

TP – *Touching Perimeter Algorithm*

TS – *Tabu Search*

TSP – *Traveling Salesman Problem*

TSPPD – *Traveling Salesman Problem with Pickup and Delivery and Loading Constraints*

UB – *Upper Bounds*

UM – Unidade Marítima

UML – *Unified Modeling Language*

UT – *Utility Boat*

UTSA – *Unified Tabu Search*

VLNS – *Very Large Neighbourhood Search*

VLP – *Vehicle Loading Problem*

VND – *Variable Neighborhood Descent*

VNS – V*ariable Neighborhood Search*

VRP – *Vehicle Routing Problem*

VRPM-TW-CL – *Vehicle Routing Problem with Multi-Trips, Time Windows and Two-Dimensional Circular Loading Constraints*

VRPPD – *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Window*

WB2L-HFVRP – *Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*

WEO – *World Energy Outlook*

WSV – *Well Stimulation Vessel*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19

1.1 OBJETIVO 22

1.1.1 Geral 22

1.1.2 Específico 22

1.2 JUSTIFICATIVA 22

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO 23

2 REFERENCIAL TEÓRICO 25

2.1 REDES DE TRANSPORTES 25

2.2 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS 27

2.2.1 Definições 27

2.2.2 Taxonomias 30

2.2.3 Formulação matemática para o VRP clássico 34

2.2.4 Abordagens de solução 36

2.3 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS 38

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE PROBLEMAS DE ROTEAMENTO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS 40

2.4.1 Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões 43

2.4.1.1 Formulação do problema 49

2.4.1.2 Revisão da Literatura sobre o 2L-CVRP e suas Variantes 51

2.5 LOGÍSTICA DE APOIO *OFFSHORE* 72

2.5.1 Abordagens para o problema de roteamento e programação de navios de suprimento de plataformas offshore 79

***2.5.2* Outros Estudos relacionados à logística *offshore* a montante 97**

3 METODOLOGIA 101

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA 101

3.2 ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA PROPOSTA 102

3.2.1 Descrição do Problema 107

3.2.1.1 Delimitação do Escopo 109

3.2.2 Proposição do Problema de Roteamento de Embarcações *Offshore* com Restrições de Carregamento Bidimensional 111

3.2.3 Levantamento de dados 113

3.2.4 Criação de Instâncias 121

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO 127

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS 136

6 CONCLUSÕES 147

6.1 TRABALHOS FUTUROS 148

7 REFERÊNCIAS 149

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é a principal fonte energética do mundo, sendo importante para vários setores econômicos, sobretudo o de transportes e o petroquímico (IEA, 2013). Segundo o *World Energy Outlook 2013* (WEO), publicação anual da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* – IEA) (IEA, 2013), atualmente a parcela de combustíveis fósseis na composição de energia global é de 82% e, mesmo com o aumento da participação das fontes renováveis, a previsão é de que no ano de 2035 tal percentual reduza apenas para 75%. Ou seja, ao menos até 2035, o petróleo e seus derivados continuam como os principais recursos energéticos necessários à produção de bens e serviços para a sociedade (SCHUTZ *et al*., 2013). Nesse cenário futuro, a expectativa é de que o Brasil esteja entre os líderes de exploração de petróleo em águas profundas e no desenvolvimento de fontes energéticas de baixo teor de carbono, tornando-se um país de essencial importância para as perspectivas mundiais. De acordo com o relatório do IEA (2013), a previsão para 2035 é de que a produção brasileira de petróleo triplique, atingindo seis milhões de barris por dia, o que equivale a um terço do crescimento líquido previsto para a produção mundial de petróleo, o que levará o país a atingir a sexta colocação entre os principais produtores.

A exploração de petróleo no Brasil se fundamenta principalmente na exploração em águas profundas, para a qual se estabelecem plataformas *offshore*. Conforme o anuário estatístico de 2013 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no ano de 2012, a produção *offshore* do país correspondeu a 91,2% do total produzido. Em termos logísticos, a produção de petróleo e gás é dividida em duas partes: a montante e a jusante. As atividades destinadas a trazer petróleo e gás para os clientes finais são conhecidas como logística a jusante, enquanto as atividades destinadas ao abastecimento das instalações *offshore* com suprimentos necessários são chamadas de logística a montante (AAS *et al*., 2007). No caso da logística a montante, as plataformas de produção de petróleo em alto mar possuem uma demanda regular por suprimentos, e são abastecidas por uma frota de embarcações de apoio *offshore* que partem de portos especializados, denominados bases de apoio.

A questão abordada nesta dissertação refere-se à logística a montante da maior indústria de petróleo e gás do Brasil, a Petrobras. Avaliando este panorama, o foco de exploração no futuro serão as regiões de pré-sal, cujos campos de produção podem estar situados a mais de 300,0 Km da costa brasileira (FERRO e TEIXEIRA, 2009). Isso tornará a operação de abastecimento mais complexa, pois além de surgirem novas unidades a serem atendidas, o que

provocará um aumento da demanda de suprimentos pelas plataformas *offshore*, sobrecarregando a base de apoio, as maiores distâncias aumentarão o tempo médio de viagem das embarcações entre o porto e as unidades *offshore*. Dessa forma, um planejamento eficiente da logística para suprimento de material e equipamentos para as plataformas é vital para a exploração pré-sal.

No que concerne à logística *offshore*, há muitos desafios a serem superados em termos de custos, distâncias, tempo e até mesmo condições climáticas e isso pode ser feito por meio do planejamento de recursos utilizados, que, neste caso, correspondem aos meios de transportes, que podem ser embarcações, quando se lida com o transporte de cargas, ou aeronaves, quando se trata do transporte de pessoas (SOBREIRA, 2013). No que tange às embarcações, estas consistem em um recurso caro na cadeia de suprimento *offshore*. Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2012), entre 2008 e 2012, os gastos das empresas brasileiras de navegação (EBN) com afretamentos para a navegação de apoio marítimo foram quadruplicados, atingindo US$ 3 bilhões em 2012, sendo que os afretamentos de navios de plataformas, tais como *Anchor Handling and Tug Supply* (AHTS), *Platform Supply Vessel* (PSV), *Diving Support Vessel* (DSV) e *Pipe Laying Support Vessel* (PLSV), totalizaram US$ 2,9 bilhões.

As embarcações utilizadas para transportar suprimentos para as unidades *offshore*, denominadas *Platform Supply Vessel* (PSV), só podem transportar as cargas no nível do convés não podendo empilhá-las por questões de equilíbrio náutico. Portanto, para arrumar as cargas no PSV é necessário levar em conta a área de convés do barco sem considerar a possibilidade de empilhamento da carga. Além disso, as cargas não podem ser rotacionadas em função de suas dimensões e são carregadas e descarregadas por guindastes. Cada plataforma pode ser atendida por uma única embarcação e não existem restrições de horário de atendimento às plataformas. Existe um tempo limite máximo de três dias que o PSV pode ficar em viagem sem regressar ao porto.

Sabe-se que, nos sistemas logísticos, o planejamento e gerenciamento das atividades de transportes de cargas são essenciais, pois além de viabilizar o fluxo de produtos ao longo da cadeia de suprimentos, os custos associados ao transporte representam, em média, de um a dois terços dos custos logísticos totais em uma empresa (LABADIE e PRINS, 2012). Dessa forma, pode-se afirmar que, em tais sistemas, qualquer melhoria que seja obtida na área de suprimentos é capaz de provocar fortes impactos na redução dos custos globais. Portanto, no

contexto analisado, é importante tentar minimizar os custos de transporte, tanto quanto possível, por meio do bom planejamento dos navios de abastecimento de uma forma eficiente.

Nesse sentido, considerando especificamente o nível operacional do planejamento de serviços de transporte, há dois aspectos fundamentais de otimização que têm sido intensivamente estudados nos últimos 50 anos (IORI e MARTELLO, 2013): determinar a rota ótima para entregar mercadorias e definir a melhor maneira de carregar tais mercadorias dentro dos veículos utilizados no transporte. Essas duas questões se referem aos problemas de roteamento de veículos e problemas de carregamento, respectivamente, os quais são do tipo *NP-hard* (LEUNG *et al.*, 2011) e caracterizam-se pela elevada complexidade de solução prática. Em geral, a construção de resoluções para essas duas áreas de pesquisa têm sido desenvolvidas separadamente. Contudo, como os dois problemas são interdependentes, há limitações relativas à aplicação destes de forma separada em contextos reais. Pela necessidade de gerar resultados mais condizentes com a realidade, recentemente, abordagens de resolução integrada dos dois problemas têm sido propostas na literatura. Um dos problemas integrados existentes na literatura é o Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Restrições de Carregamento Bidimensional (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints* – 2L-CVRP) que tem por função criar rotas para veículos e simultaneamente elaborar a arrumação da carga no nível do piso do veículo sem considerar a possibilidade de empilhamento (IORI *et al.*, 2007).

Diante da importância do tema e do fato de a literatura específica ainda ser limitada, esta dissertação tem por objetivo propor um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o 2L-CVRP aplicado ao problema de planejamento da logística de suprimento de plataformas de exploração de petróleo *offshore*. Ressalta-se que, apesar de existirem algumas publicações acerca do planejamento de embarcações *offshore*, que incluem, sobretudo, aspectos referentes à determinação de rotas, composição e tamanho da frota ótima e capacidade de armazenagem da instalação *offshore* (BREJON e BRINATI, 1998; FAGERHOLT e LINDSTAD, 2000; AAS *et al*., 2007; GRIBKOVSKAIA *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2009; HALVORSEN-WEARE e FAGERHOLT, 2011; LOPES, 2011; HALVORSEN-WEARE *et al.*, 2012; SHYSHOU *et al.* 2012; VIANNA *et al.*, 2012; HENTY *et al.*,2012; VAQUERO *et al.*, 2012 ; FRIEDBERG e UGLANE, 2013; SOPOT e GRIBKOVSKAIA, 2014) e mais recentemente, aspectos ambientais (PANAMARENKA, 2011; NORLUND e GRIBKOVSKAIA, 2013), nenhuma delas trabalhou de forma integrada a roteamento com a arrumação da carga na embarcação usando o 2L-CVRP.

Com base nesta nova perspectiva, o modelo proposto foi denominado *Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet of Vehicle Routing Problem* (WB2L-HFVRP) e visa elaborar para cada embarcação uma rota e a arrumação da carga da rota no convés para atender às várias plataformas de exploração *offshore* de petróleo. O WB2L-HFVRP apresenta em sua função objetivo a minimização do número de embarcações utilizadas, da distância percorrida pela embarcação, e da diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos da embarcação, com o intuito de manter o equilíbrio náutico. A principal diferença do modelo proposto em relação aos modelos existentes na literatura reside no fato de o modelo incorporar, ao mesmo tempo, frota heterogênea e tratar do equilíbrio náutico da embarcação.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Geral

Desenvolver um modelo matemático baseado no 2L-CVRP para a roteamento de navios de suprimentos entre o porto e as plataformas *offshore* prevendo a arrumação da carga no convés de forma a manter o equilíbrio náutico do navio.

1.1.2 Específico

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Desenvolver um modelo matemático de arrumação de carga em recipiente bidimensional considerando o equilíbrio de momento dos pesos das cargas em relação ao centro do recipiente bidimensional.
- Comparar os resultados gerados pelo modelo proposto para instâncias reais com o que ocorre prática e verificar se há economia em termos de distância navegada.

1.2 JUSTIFICATIVA

As atividades de exploração e produção (E&P) *offshore* de petróleo e gás exigem uma estrutura logística complexa a fim de suprir plataformas com itens essenciais para a realização de suas operações, como tubos, equipamentos, óleo diesel, entre outros, e para manutenção da tripulação, como alimentos e água potável (ALMEIDA, 2009). Atrasos ou a não entrega de

suprimentos podem interferir nas atividades operacionais em curso nas plataformas, ocasionando gastos. Especificamente, a exploração do pré-sal irá impor desafios ainda maiores à logística de suprimentos, pois as plataformas *offshore* poderão estar localizadas a até 300,0 km da costa, o que impactará no tempo de navegação e distâncias percorridas.

Dessa forma, é importante planejar os recursos necessários ao suprimento da logística *offshore*, a fim de minimizar custos inerentes ao processo de atendimento às plataformas, e, assim, alcançar um diferencial competitivo nas operações *offshore*. Nesse sentido, um recurso que constitui um elo significante na cadeia de suprimentos é a embarcação de apoio marítimo. Trata-se de um elemento caro e, portanto, é preciso otimizar sua utilização, buscando a melhor composição da frota e a redução das distâncias navegadas.

Portanto, o objetivo do trabalho consiste em propor um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) baseado no 2L-CVRP para roteirizar embarcações de suprimento e arrumar a carga no convés do navio de forma a manter o equilíbrio náutico. Busca-se, com isso, minimizar os custos operacionais do transporte de suprimentos, em termos de custos variáveis, diretamente proporcionais à distância percorrida, e custos fixos associados à quantidade de navios usados.

No âmbito da pesquisa operacional, a relevância deste trabalho reside na apresentação de um modelo que representa uma contribuição para o meio científico, já que até então na literatura referente a 2L-CVRP não foi encontrado um modelo que incorpore ao mesmo tempo frota heterogênea e equilíbrio náutico e, na literatura de roteamento no âmbito de logística *offshore*, não há modelos que explorem o aspecto de carregamento e arrumação de cargas segundo o *Two Bin Packing Problem* (2BPP).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, de caráter introdutório, esta dissertação é constituída por outros sete capítulos.

No segundo capítulo apresenta-se o referencial teórico. No primeiro momento conceituam-se redes de transportes, descrevendo-se acerca da teoria dos grafos. Posteriormente, define-se brevemente o problema de roteamento de veículos, bem como suas variantes e taxonomias. Em seguida aborda-se sucintamente o problema de carregamento, destacando-se as principais características. Também se define o problema integrado de roteamento e carregamento,

caracterizando-se as classificações existentes na literatura, e detalhando especificamente o problema de roteamento de veículos com restrições de carregamento bidimensionais (2L-CVRP), que consiste na categoria utilizada nesta dissertação. Além disso, explica-se brevemente o conceito e funcionamento da cadeia de suprimentos *offshore*. Este capítulo também inclui uma revisão na literatura sobre o 2L-CVRP e sobre roteamento e programação de navios usados na logística *offshore*, que compreende o levantamento dos autores que realizaram pesquisas relativas a este assunto, destacando as principais abordagens de resolução adotada.

O terceiro capítulo abrange a metodologia do trabalho, relatando-se as etapas usadas para atingir os objetivos, como a coleta e o tratamento de dados. Também contempla a descrição do problema tratado e a delimitação do escopo do estudo.

No quarto capítulo apresenta-se o modelo matemático, que adiciona restrições de equilíbrio de peso e utiliza frota heterogênea, que são consideradas variantes do problema tradicional.

O quinto capítulo contém os resultados dos experimentos computacionais e as subsequentes análises.

No sexto capítulo constam as conclusões e também recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

O sétimo capítulo consiste nas referências.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo abordam-se os dois principais problemas tratados neste estudo: a roteamento e o carregamento de veículos, com destaque para o 2L-CVRP e para o problema de roteamento e programação de navios de apoio a plataformas *offshore*. Além disso, explanam-se alguns conceitos concernentes à logística de suprimento *offshore*.

Na seção 2.1 apresentam-se brevemente os conceitos relativos a redes de transportes. A definição conceitual e a classificação dos problemas de roteamento de veículos são apresentadas na seção 2.2. Já os conceitos relativos ao problema de carregamento de veículos são abordados na seção 2.3. Na seção 2.4 define-se a integração entre problemas de roteamento e carregamento. A seção 2.4.1 contém a definição do 2L-CVRP, enquanto a subseção 2.4.1.1 apresenta a formulação geral para o problema e a seção 2.4.1.2 compreende a revisão da literatura sobre o 2L-CVRP e suas variantes. A seção 2.5.1 abrange a literatura referente ao problema de roteamento e programação de navios no contexto de logística *offshore*, a qual tem nas pesquisas brasileiras e norueguesas as principais fontes. Ressalta-se que ao final das seções 2.4.1.2 e 2.5.1 há um quadro resumo contendo os principais aspectos da revisão da literatura para o 2L-CVRP e roteamento em logística *offshore*, respectivamente. Por fim, a seção 2.5.2 apresenta outros estudos relacionados à logística *offshore*. Por uma questão de padronização, serão adotadas as siglas em inglês dos problemas apresentados.

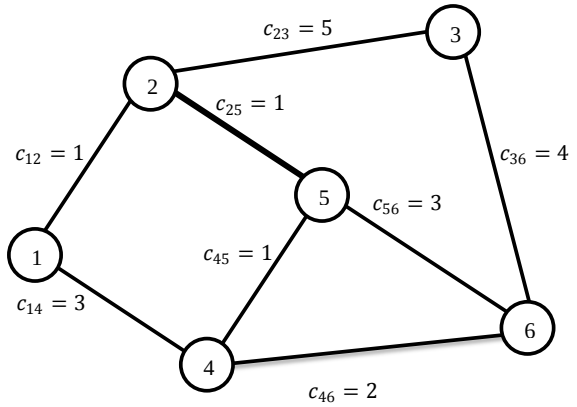
2.1 REDES DE TRANSPORTES

Segundo Goldbarg e Luna (2005), um grafo é uma estrutura que representa um conjunto de elementos chamados *nós* (ou *vértices*) e suas relações de interdependência, denominadas *arestas* (ou *arcos*). Em termos matemáticos, considerando um conjunto finito de N nós e um conjunto finito A de arestas que conectam os pares de nós, um grafo pode ser denotado por $G = (N, A)$. De acordo com Arenales *et al.* (2007), uma *rede* consiste em um grafo $G = (N, A)$, cujos nós e/ou arestas têm valores associados. A notação (i, j) expressa um arco que une os nós i e j de uma rede (NOVAES, 1989).

Especificamente, Novaes (1989) define uma *rede de transportes* como um grafo, no qual os arcos representam as vias de transporte e usualmente associam-se a eles grandezas que podem expressar distância, tempo ou custo. Considere, por exemplo, o conjunto de nós $N = \{1,2,3,4,5,6\}$, o conjunto de arcos $A = \{(1,2), (1,4), (2,3), (2,5), (4,5), (4,6), (3,6), (5,6)\}$ e

os valores de custo associados a cada arco, $c_{12} = c_{21} = 1, c_{14} = c_{41} = 3, c_{23} = c_{32} = 5, c_{25} = c_{52} = 1, c_{45} = c_{54} = 1, c_{46} = c_{64} = 2, c_{36} = c_{63} = 4, c_{56} = c_{65} = 3.$ Neste exemplo, ainda não se define o sentido de orientação entre os pares de arcos. A Figura 1 ilustra a representação desta rede.

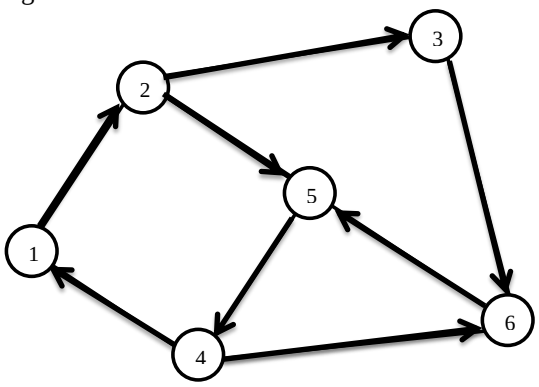
Figura 1 - Representação gráfica de uma Rede de Transporte



Fonte: Adaptado de Novaes (1989).

Caso uma direção de fluxo definida seja associada a todos os arcos de uma rede, tem-se o *grafo orientado* (ou *direcionado*), conforme mostra a Figura 2. Nesta situação, o arco denotado pelo par ordenado (i, j), tem i como nó inicial e j como nó final e é representado graficamente por uma flecha, indicando a orientação relevante (NOVAES, 1989; ARENALES *et al*, 2007).

Figura 2 - Grafo Orientado

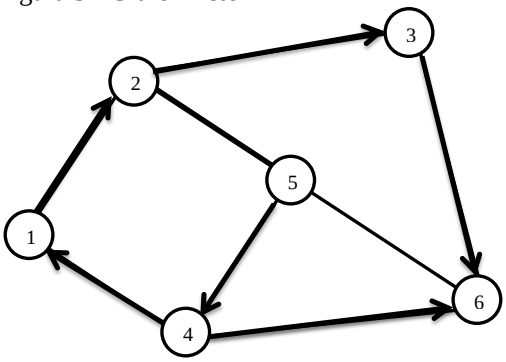


Fonte: Adaptado de Novaes (1989).

Na Figura 2, a representação do arco que une os nós 4 e 5, por exemplo, é (5,4), não havendo a notação (4,5), já que o arco está associado a uma direção específica denotada pela seta no grafo.

Denomina-se grafo *não orientado* aquele em que nenhum dos arcos é direcionado. Já o grafo *misto* apresenta tanto arcos direcionados como não orientados, como ilustra a Figura 3 (NOVAES, 1989).

Figura 3 - Grafo Misto



Fonte: Adaptado de Novaes (1989).

2.2 PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

2.2.1 Definições

Roteamento de veículos é um processo para elaboração de rotas para veículos de uma frota, com a finalidade de visitar um conjunto de cidades ou clientes geograficamente dispersos, ao menor custo possível (LAPORTE, 1992).

Um sistema de roteamento, segundo Goldbarg e Luna (2005), trata-se de conjunto organizado de meios que visa satisfazer demandas situadas nos arcos ou nos nós de alguma rede de transportes. Tal sistema pode ser dividido em três categorias de decisões: estratégica, tática e operacional. No que diz respeito às decisões estratégicas, estas impactam no longo prazo sobre o sistema e envolvem a determinação de: mercado de atuação, dimensões da qualidade, localização de fábricas e depósitos, tipos de veículos e restrições legais. Já em relação às decisões táticas, estas abrangem a definição de: áreas atendidas, número de rotas, número de veículos, contratação de mão-de-obra, regime de trabalho, localização e número de garagens e nível de estoque. O nível operacional, por sua vez, engloba decisões relativas à operação da frota de veículos e ao emprego da mão-de-obra. A definição dos problemas de roteamento de veículos (*Vehicle Routing Problem* – VRP) acontece neste nível.

Partyka e Hall (2000) afirmam que um problema de roteamento real é determinado por três fatores básicos: decisões, objetivos e restrições. As *decisões* se referem a atribuir clientes a um conjunto de veículos, abrangendo também a programação e o sequenciamento das visitas. No que tange aos *objetivos*, pretende-se minimizar custos ao mesmo tempo em que se propõe um serviço de alto nível aos clientes. Além disso, o procedimento de roteamento está sujeito a *restrições*, as quais devem ser respeitadas, sendo elas relacionadas com os recursos disponíveis, limites de tempo e aspectos de trânsito, como, por exemplo, velocidades máximas permitidas.

Conforme Laporte *et al.* (2000), o VRP consiste em projetar rotas de veículos de forma a minimizar o custo total, cada uma começando e terminando no depósito, garantindo que cada cliente seja visitado exatamente uma vez e a demanda total de qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende.

Para Bodin *et al.* (1983) a roteamento é, em primeiro lugar, um problema de ordem espacial cujo objetivo é minimizar a distância percorrida. Contudo, em situações reais, o problema pode estar sujeito concomitantemente a aspectos espaciais e temporais, o que faz com que haja um tempo associado a cada atividade. Por isso, algumas vezes o problema também é referido como *Roteamento e Programação de Veículos* (*Routing and Scheduling of Vehicles*).

O VRP consiste na determinação de rotas ótimas usadas por uma frota de veículos situados em um ou mais depósitos, para atender a um conjunto de clientes. Em aplicações práticas do VRP, a construção de uma rota está sujeita a muitas restrições operacionais. Por exemplo, o serviço pode abranger tanto entregas quanto coletas, a capacidade dos veículos deve ser respeitada ao longo de cada rota, o comprimento total de cada rota deve ser menor ou igual a um limite predeterminado, os clientes devem ser atendidos dentro de uma janela de tempo, a frota pode ser heterogênea, pode haver relações de precedência entre os clientes, a demanda dos clientes pode não ser totalmente conhecida com antecedência, os pedidos de um cliente podem ser fracionados entre diferentes veículos, e algumas características do problema, como demanda ou tempo de viagem, podem variar dinamicamente (TOTH e VIGO, 2002a).

De acordo com Gendrau *et al.* (1996), o conjunto de restrições operacionais compreende: 1) Restrições de capacidade: cada cliente i tem uma demanda d_i e a demanda total de uma rota não pode ultrapassar a capacidade do veículo; 2) Restrições de duração: a rota feita por cada veículo deve ser limitada em termos de tempo ou distância; 3) Restrições de janela de tempo: cada cliente i deve ser visitado dentro de uma janela de tempo $[a_i, b_i]$. Normalmente, para que

uma rota seja considerada válida é preciso que as restrições operacionais do problema de roteamento de veículos sejam satisfeitas.

Segundo Laporte (2009), o VRP clássico pode ser definido como um grafo orientado $G = (V, A)$, em que $V = \{0, \dots, n\}$ é o conjunto de vértices e $A = \{(i,j): i,j \in V, i \neq j\}$ corresponde ao conjunto de arcos relacionados às ligações entre vértices. O vértice 0 representa o depósito ao passo que os demais vértices correspondem aos clientes. Uma frota de m veículos idênticos de capacidade Q está localizada no depósito. O tamanho da frota é uma constante ou é uma variável de decisão. Cada cliente i tem uma demanda não negativa q_i. A cada arco $(i,j) \in A$ associa-se um atributo c_{ij}, que pode designar custo de viagem, distância ou tempo de viagem, definindo assim uma matriz. O VRP visa construir m rotas de veículos de modo que cada rota comece e termine no depósito, cada cliente é visitado exatamente uma vez por um único veículo, a demanda total de uma rota não exceda Q, e o comprimento total de uma rota não ultrapasse um limite L pré-estabelecido. Os mesmos autores ainda definem o caso *simétrico* do VRP, ou seja, quando $c_{ij} = c_{ji}$ para todo $(i,j) \in A$, no qual se usa um conjunto de arcos dado por $E = \{(i,j): i,j \in V, i < j\}$.

Em geral, têm-se como dados de entrada do VRP clássico os seguintes elementos (GOLDBARG E LUNA, 2005): os clientes a serem atendidos pelo depósito; a demanda dos clientes; o tamanho da frota disponível no depósito; o tipo de veículo utilizado em termos de capacidade, velocidade, entre outros; e regras para realizar carga e descarga do veículo. A partir desses elementos, o planejamento terá como finalidade definir o roteamento de veículos e o sequenciamento de atividades que minimizem os custos. O objetivo de diminuir os custos, por sua vez, pode ser alcançado por meio da minimização de prazos de entrega, distância percorrida, alocação de mão-de-obra, número de veículos, entre outros.

O VRP exerce uma função preponderante na área de gerenciamento da distribuição e logística e se aplica a situações práticas que ocorrem em indústrias, no comércio, no setor de serviços, na segurança, na saúde pública e no lazer (GOLDBARG e LUNA, 2005; ARENALES *et al.*, 2007). Entre o vasto número de aplicações reais que o problema apresenta, Goldbarg e Luna (2005) e Novaes (2007) listam alguns exemplos: a distribuição de jornais, de produtos diversos, de bebidas, de produtos químicos, de derivados de petróleo, de vagões ferroviários, de gás, de material fotográfico, de alimentos, de recolhimento de leite e roteamento de navios de longo curso (petroleiros); coleta de lixo urbano; entrega domiciliar de correspondência, entre outros.

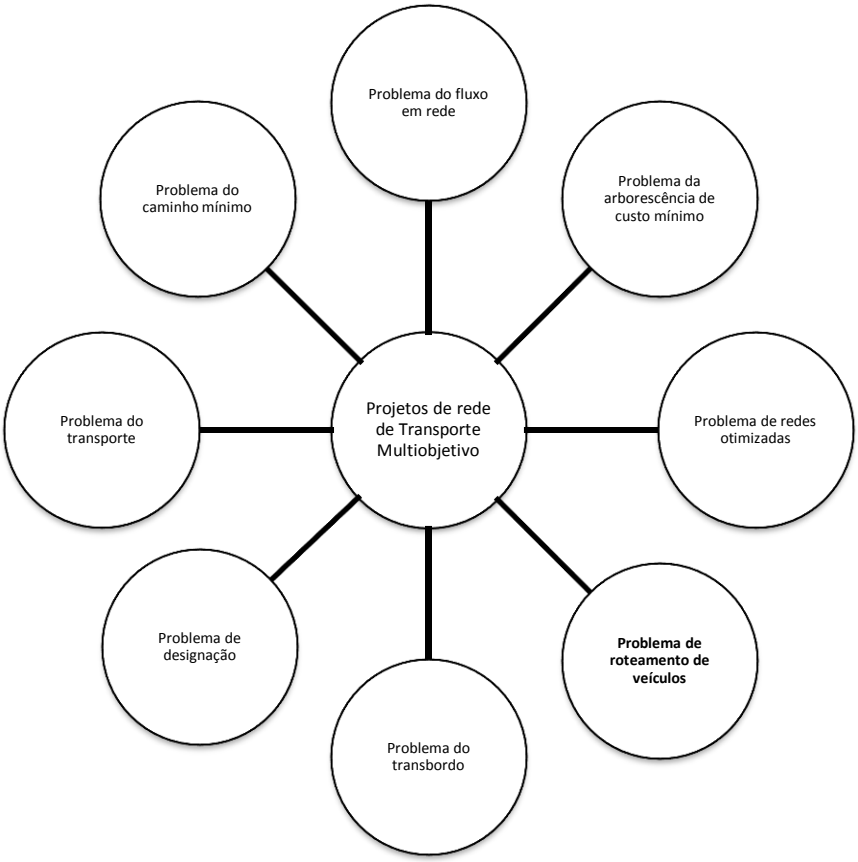
O VRP tem sido intensamente estudado pela comunidade de pesquisa operacional desde a publicação pioneira de Dantzig e Ramser (1959), devido à sua importância econômica, dado seu enorme potencial de aplicações práticas, e pelos desafios metodológicos que ele representa, pois se trata de um problema de elevada complexidade, do tipo *NP-hard* (LAPORTE *et al.*, 2013).

Em suma, o VRP consiste no problema de projetar rotas de entrega de menor custo a partir de um depósito a um conjunto de clientes geograficamente dispersos, sujeito a restrições operacionais. Este problema tem grande importância nos sistemas de distribuição física do mundo real, uma vez que os custos associados com a operação de veículos compõem uma relevante parcela nos custos logísticos totais, o que significa que mesmo pequenas economias nesta área podem refletir consideravelmente na economia global do sistema.

2.2.2 Taxonomias

Current e Marsh (1993) propõem uma taxonomia para os problemas de redes de transporte multiobjetivo em que o VRP, junto a outros sete tipos de problemas (Problema de designação, Problema do transbordo, Problema de redes otimizadas, Problema de transporte, Problema do Caminho Mínimo, Problema do Fluxo em rede e Problema de arborescência de custo mínimo), surge no primeiro nível de classificação, que é baseada na estrutura matemática inerente ao modelo e/ou no propósito da formulação (Figura 4).

Figura 4 - Rede de transporte multiobjetivo e suas taxonomias



Fonte: Current e Marsh (1993).

Uma forma de classificar o problema foi apresentada por Eksioglu *et al.*(2009). Os autores propuseram uma taxonomia com três níveis de subdivisão. O primeiro nível apresenta cinco categorias: (1) Tipo de estudo; (2) Características do cenário; (3) Características físicas do problema; (4) Características de informação; e (5) Características dos dados. Dentro da primeira categoria, um problema é classificado de acordo com seu conteúdo. Na segunda categoria, listam-se os fatores que não fazem parte das restrições incorporadas na solução, mas parte do contexto dos problemas. A terceira categoria abrange os fatores que afetam diretamente a solução do problema e trata-se de uma extensão do trabalho de Bodin e Golden (1981). A quarta categoria lida com a solução do VRP apresentada pela qualificação da natureza, acessibilidade e processamento da informação. A última categoria objetiva classificar os tipos de dado com base na sua origem. O Quadro 1 apresenta a classificação proposta pelos autores.

Quadro 1 - Taxonomia do VRP proposta por Eksioglu *et al.* (2009) (Tradução Livre)

(Continua)

	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3
1ª Categoria	1. Tipo de Estudo	1.1 Teoria	
		1.2 Métodos Aplicados	1.2.1 Métodos Exatos 1.2.2 Heurísticas 1.2.3 Simulação 1.2.4 Métodos de solução de tempo real
		1.3 Implementação documentada	
		1.4 Levantamento, revisão ou meta-pesquisa	
2ª Categoria	2. Características do Cenário	2.1 Número de paradas na rota	2.1.1 Conhecida (determinística) 2.1.2 Parcialmente conhecida, parcialmente probabilística
		2.2 Restrição de carregamento fracionado	2.2.1 Fracionamento permitido 2.2.2 Fracionamento não permitido
		2.3 Quantidade demandada pelo cliente	2.3.1 Determinística 2.3.2 Estocástica 2.3.3 Desconhecida[1]
		2.4 Tempo de solicitação de novos clientes	2.4.1 Determinística 2.4.2 Estocástica 2.4.3 Desconhecida
		2.5 Tempo de espera/serviço no local	2.5.1 Determinístico 2.5.2 Tempo dependente 2.5.3Tipo de veículo dependente 2.5.4 Estocástico 2.5.5 Desconhecido
		2.6 Estrutura de Janela de Tempo	2.6.1 Janelas de Tempo flexíveis 2.6.2 Janelas de Tempo rígidas 2.6.3 Mistura de ambas
		2.7 Horizonte de Tempo	2.7.1 Período Único 2.7.2 Múltiplos Períodos
		2.8 *Backhauls*	2.8.1 Nós solicitam coleta e entrega simultânea 2.8.2 Nós solicitam tanto o serviço *linehaul* quanto *backhaul*, mas não ambos
		2.9 Restrições de coberturas de nós/arcos	2.9.1 Restrições de ligação e precedência 2.9.2 Restrições de cobertura de subconjuntos 2.9.3 Recurso Permitido
3ª Categoria	3. Características físicas do problema	3.1 Projeto da rede de transporte	3.1.1 Rede direcionada 3.1.2 Rede Não direcionada
		3.2 Localização de endereços (clientes)	3.2.1 Clientes em nós 3.2.2 Casos de roteamento em arcos
		3.3 Localização geográfica dos clientes	3.3.1 Urbana (dispersa com um padrão) 3.3.2 Rural (aleatoriamente dispersa) 3.3.3 Mista
		3.4 Número de pontos de origem	3.4.1 Origem única 3.4.2 Múltiplas origens
		3.5 Número de ponto de instalações de carga/descarga (depósitos)	3.5.1 Depósito único 3.5.2 Múltiplos depósitos

Fonte: Eksioglu *et al*. (2009)

[1] Desconhecida refere-se ao caso no qual a informação é revelada em tempo real (ou seja, estudos dinâmicos e *fuzzy* caem nessa categoria).

Quadro 1 – Taxonomia do VRP proposta por Eksioglu *et al.* (2009) (Tradução Livre)

(Conclusão)

	NÍVEL 1	NÍVEL 2	NÍVEL 3
3ª Categoria	3. Características físicas do problema	3.6 Tipo de janela de tempo	3.6.1 Restrição sobre os clientes 3.6.2 Restrições sobre as vias 3.6.3 Restrições sobre o depósito 3.6.4 Restrições sobre os motoristas/ veículos
		3.7 Número de veículos	3.7.1 Exatamente *n* veículos (*TSP* neste segmento) 3.7.2 Até *n* veículos 3.7.3 Número ilimitado de veículos
		3.8 Consideração de Capacidade	3.8.1 Veículos Capacitados 3.8.2 Veículos Não Capacitados
		3.9 Homogeneidade do Veículo (Capacidade)	3.9.1 Veículos Similares 3.9.2 Veículos com cargas específicas[2] 3.9.3 Veículos heterogêneos 3.9.4 Veículos com clientes específicos[3]
		3.10 Tempo de viagem	3.10.1 Determinístico 3.10.2 Função dependente (uma função do tempo atual) 3.10.3 Estocástico 3.10.4 Desconhecido
		3.11 Custo de transporte	3.11.1 Dependente do tempo de viagem 3.11.2 Dependente da distância 3.11.3 Dependente do veículo[4] 3.11.4 Dependente da operação 3.11.5 Função do atraso 3.11.6Relacionado com perigo/ risco implícito
4ª Categoria	4. Características de Informação	4.1 Evolução da informação	4.1.1 Estática 4.1.2 Parcialmente dinâmica
		4.2 Qualidade da informação	4.2.1 Conhecida (Determinística) 4.2.2 Estocástica 4.2.3 Prevista 4.2.4 Desconhecida (tempo real)
		4.3 Disponibilidade de informação	4.3.1 Local 4.3.2 Global
		4.4 Processamento de informação	4.4.1 Centralizada 4.4.2 Descentralizada
5ª Categoria	5. Característica dos dados	5.1 Dados usados	5.1.1 Dados do mundo real 5.1.2 Dados sintéticos 5.1.3 Dados reais e sintéticos
		5.2 Nenhum dado usado	

Fonte: Eksioglu *et al*. (2009)

[2] Cada veículo pode ser usado para lidar com um tipo específico de carga.
[3] Um cliente deve ser visitado por um tipo específico de veículo.
[4] Custo de operar um veículo não é negligenciado.

Outra forma de classificação pode ser encontrada em Eiselt *et al.* (1995a, 1995b) e Novaes (1989) que definem o *Problema de Roteamento Geral* em duas grandes categorias:

a) Problema de Roteamento em Arcos (Caminho Euleriano)

   Nesta classe, a demanda ocorre ao longo dos arcos e o objetivo é definir o menor custo para percorrer um conjunto de arcos específicos de um grafo, incluindo ou não restrições (EISELT *et al*, 1995a).

   Neste caso, podem-se destacar o Problema do Carteiro Chinês (*Chinese Postman Problem* – CPP) e o Problema do Carteiro Rural (*Rural Postman Problem* – RPP).

b) Problema de Roteamento em Nós (Caminho Hamiltoniano)

   Nesta classificação, os locais de demanda ocorrem nos nós e o intuito é combinar os nós da rede de tal modo que se encontre o trajeto com o custo mínimo. Neste caso, pode-se minimizar distância, custo total de viagem, tempo, entre outros aspectos conforme já mencionado.

   Há dois grupos que são tratados dentro dessa classe: o problema de roteamento sem restrições, denominado Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem* – TSP), e o problema de roteamento com restrições, chamado também de Problema de Roteamento de Veículos (*Vehicle Routing Problem* – VRP), no qual pode haver um ou mais depósitos e vários veículos de capacidade limitada (NOVAES, 2007). Tanto o TSP quanto o VRP apresentam diversas variantes na literatura.

Considerando o escopo deste trabalho, que consiste na distribuição física de cargas para plataformas, tratar-se-á, especificamente, da classe que o representa, que é a Roteamento em Nós.

2.2.3 Formulação matemática para o VRP clássico

O PRV clássico é dado por um grafo orientado $G = (N, E)$, em que $N = C \cup \{0, n+1\}$, $C = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós que representam os clientes, e 0, n+1 são os nós que designam o depósito. O conjunto $E = \{(i,j): i,j \in N, i \neq j, i \neq n+1, j \neq 0\}$ corresponde aos arcos relacionados às ligações entre nós. Nenhum arco termina no nó 0 e nenhum arco inicia no nó $n+1$. Todas as rotas começam em 0 e terminam em $n+1$. A cada arco $(i,j) \in$

E estão associados um custo c_{ij} e um tempo de viagem t_{ij}. O tempo de viagem t_{ij} abrange o tempo de serviço do cliente i. Cada cliente i tem uma demanda d_i. No depósito, há um conjunto K de veículos idênticos, cada veículo $k \in K$ com capacidade Q. O objetivo é minimizar o custo total de viagens, sujeito às restrições: cada rota inicia e termina no depósito; cada cliente pertence somente a uma rota; a demanda total de uma rota não pode ultrapassar a capacidade Q do veículo; o tempo de viagem de uma rota não pode extrapolar o limite D. Seja x_{ijk} uma variável binária que assume o valor 1 se o veículo k percorre o arco (i,j) e 0 caso contrário. A formulação do PRV clássico é (ARENALES *et al.*, 2007):

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ijk} \qquad (1)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \qquad \forall\, i \in C \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq Q \qquad \forall\, k \in K \qquad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijk} \leq D \qquad \forall\, k \in K \qquad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \qquad \forall\, h \in C, \forall\, k \in K \qquad (6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,n+1,k} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \qquad S \subset C, 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor, \forall\, k \in K \qquad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, (i,j) \in E \qquad (9)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo das rotas. As restrições (2) garantem que cada cliente i é alocado a um único veículo. As restrições (3) asseguram que a demanda total de cada rota do veículo k não extrapola a capacidade Q do veículo. As restrições (4) impõem que o tempo de cada rota do veículo k não ultrapassa o limite D. As restrições (5), (6) e (7) são restrições de fluxo em redes, que determinam que cada veículo k saia do depósito (nó 0) somente uma vez, deixe o nó h se e somente se entrar neste nó, e volte ao depósito (nó $n+1$) apenas uma vez. As restrições (7) é redundante, porém é conservada no modelo para ressaltar

a estrutura de redes. As restrições (8) asseguram a não-existência de sub-rotas, e as restrições (9) indicam que a variável x_{ijk} é binária.

Na prática, há muitas classes e variantes do problema devido à diversidade de regras de funcionamento e limitações encontradas em aplicações da vida real (LAPORTE *et al.*, 2009). Algumas das principais variações do VRP, a partir da combinação de diferentes restrições e objetivos, são (CORDEAU *et al.*, 2005; KUMAR e PANNEERSELVAM, 2012):

- VRP capacitado (*Capacitated Vehicle Routing Problem* – CVRP): incorpora a restrição de capacidade, determinando a carga máxima que o veículo pode transportar. Ressalta-se que a supracitada descrição do VRP clássico de Laporte (2009), já inclui essa restrição, e, portanto, é análoga à definição do CVRP encontrada no trabalho de Toth e Vigo (2002b);
- VRP com janela de tempo (VRP *with Time Window* – VRPTW): inclui a restrição de intervalo de tempo no qual o cliente deve ser atendido;
- VRP com coleta e entrega (VRP *with pickup and delivery* – VRPPD*)*: atende em uma mesma rota uma série de coletas e entregas. Há algumas variantes, entre as quais: coleta e entrega simultânea; entregar primeiro e coletar depois; coletar de em um cliente e entregar para outro cliente ou para o depósito;
- VRP com frota heterogênea (*heteregeneous fleet* VRP – HFVRP): neste caso, o custo de uma rota corresponde à soma dos custos fixos e variáveis dos veículos usados. Assume-se que os custos crescem linearmente com a distância percorrida.

2.2.4 Abordagens de solução

No que se refere aos métodos de solução do VRP, há basicamente três tipos: 1) abordagens exatas; 2) heurísticas clássicas, a grande maioria desenvolvida entre as décadas de 60 e 90; e 3) meta-heurísticas, cujo crescimento tem ocorrido ao longo dos últimos 20 anos (LAPORTE *et al.*, 2000; LAPORTE, 2009).

Métodos exatos são baseados em programação linear inteira (*Integer Linear Programming* – ILP) (LABADIE e PRINS, 2012). Para o VRP e suas variantes, Laporte (2009) destaca o uso de programação dinâmica, de formulações de fluxo de veículos e de fluxo de *commodities* de dois ou três índices e de formulações de conjunto de particionamento (*Set Partitioning formulation)*. As abordagens exatas para resolver o VRP, sobretudo o CVRP, incluem os algoritmos *Branch-and-Bound* (B&B), *Branch-and-Cut* (B&C) e *Branch-and-Price* (B&P) (KUMAR e PANNEERSELVAM, 2012). Os algoritmos exatos limitam-se a instâncias

relativamente pequenas e os tempos computacionais são altamente variáveis (CORDEAU *et al.*, 2005). As melhores técnicas exatas são o *Branch-and-Cut-and-Price* de Fukasawa *et al.* (2006) e o *Set Partitioning Formulation* de Baldacci *et al.* (2008), que podem resolver instâncias envolvendo cerca de 100 clientes (LAPORTE, 2009). *Softwares* comerciais solucionadores de ILP, por sua vez, são capazes de resolver diretamente instâncias ainda menores, com cerca de 20 clientes (LABADIE e PRINS, 2012).

Heurísticas e meta-heurísticas, ao contrário das abordagens exatas, conseguem lidar com instâncias de maiores escalas e são mais adequadas para solucionar problemas práticos, que incluam restrições do mundo real, como, por exemplo, coleta e entrega, janela de tempo e estocasticidade na demanda. Uma meta-heurística é um algoritmo desenvolvido para resolver de forma aproximada problemas de otimização complexos não sendo necessárias modificações profundas para cada problema (BOUSSAÏD *et al.*, 2013). Ou seja, uma meta-heurística é uma estrutura algorítmica geral que pode ser aplicada a distintos problemas de otimização com relativamente poucas alterações que possam adaptá-la a um problema específico (METAHEURISTICS NETWORK, 2015). O prefixo grego "meta", presente no nome, indica que estes algoritmos são heurísticas de "nível superior", em contraste com as heurísticas de problemas específicos. Usualmente, aplicam-se meta-heurísticas a problemas para os quais não há nenhum algoritmo específico para resolvê-los (BOUSSAÏD *et al*., 2013).

As heurísticas clássicas para o VRP incluem heurísticas de construção e de melhoria. Em relação às heurísticas de construção citam-se (CORDEAU *et al.*, 2005; LAPORTE, 2009): o algoritmo de economia de Clarke e Write (C&W) (1964); o mecanismo de varredura de Gillet e Miller (1974); o método de agrupar primeiro e roteirizar segundo *(cluster-first, route-second heuristic)* de Fisher e Jaikumar (1981); o método de roteirizar primeiro e agrupar segundo (*route-first cluster-second)* de Beasley (1983). No que concerne às heurísticas de melhoria, em geral, empregam-se dois métodos para efetuar uma pós-otimização em uma solução de VRP: métodos de melhoria intra-rota, que melhora cada trajeto separadamente por meio de heurísticas do problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* – TSP), como, por exemplo, *2-opt* e *4-opt;* e métodos de melhoria inter-rota, que consiste em remover um ou vários clientes das rotas simultaneamente e realocá-los, como, λ-*interchanges* e *cyclic exchanges*.

No que diz respeito às meta-heurísticas, há três classificações (CORDEAU *et al*, 2005; LAPORTE, 2009): busca local, busca de população e mecanismos de aprendizagem. Entre as meta-heurísticas de busca local, que consiste basicamente em explorar o espaço de soluções,

modificando a solução atual para outra solução na sua vizinhança a cada iteração, destacam-se na resolução do VRP e suas variantes: busca tabu (*Tabu Search* – TS); recozimento simulado (*Simulated Annealing* – SA); recozimento determinístico *(Deterministic Annealing* – DA); busca na vizinhança variável (*Variable Neighbourhood Search* – VNS*)*; busca na vizinhança muito grande (*Very Large Neighbourhood Search* – VLNS) e busca na vizinhança adaptativa grande (*Adaptive Large Neighbourhood Search* - ALNS). Já com relação às meta-heurísticas de busca de população aplicadas ao VRP, têm-se: algoritmos evolucionários, que incluem algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms* – GA), algoritmos meméticos (*Memetic Algorithms* – MA*)* e algoritmos híbridos; e procedimentos de memória adaptativa. Por fim, as meta-heurísticas de mecanismos de aprendizagem incluem, entre outros, redes neurais e otimização por colônia de formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO).

2.3 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

Os problemas de carregamento de veículos (*Vehicle Loading Problem* – VLP) pertencem à família dos problemas de *corte e empacotamento* (*Cutting and Packing* – C&P) (DYCKHOFF, 1990). Os problemas de C&P apresentam a mesma estrutura, que pode ser sumarizada como um conjunto de itens, com dimensões geométricas definidas, os quais devem ser atribuídos a um conjunto de objetos grandes também com determinada forma geométrica, de tal modo que os limites geométricos sejam respeitados; ou seja, todos os itens devem estar totalmente contidos nos objetos de dimensões maiores e não devem se sobrepor (WÄSHER *et al.*, 2007). Os objetos grandes podem ser caixas, contêineres, *bins*, um pátio, uma superfície de carregamento de um caminhão, navio ou avião, entre outros. Já os itens podem ser caixas, contêineres, blocos de granito, bobinas, cargas gerais, etc (GUENZANI e GERZELJ, 2013). Tais problemas devem otimizar uma função objetivo, que, em geral, refere-se à minimização do desperdício, que pode expressar a quantidade de material ou espaço não usado dos objetos grandes (ARAÚJO, 2006).

Sabe-se que, em problemas de distribuição do mundo real, as demandas dos clientes são caracterizadas tanto por peso quanto por forma. Sendo assim, é preciso assegurar que os itens transportados estejam viavelmente arrumados dentro da superfície de carregamento do veículo. Este tipo de questão relaciona-se com o problema de empacotamento de *bins* (*Bin Packing Problem* – BPP), o qual pode ser descrito como a inserção, sem sobreposição, de um conjunto de itens retangulares em um número suficiente de *bins* retangulares (WÄSHER *et*

al., 2007; DUHAMEL *et al.*, 2011; IORI e MARTELLO, 2013). A diferença entre a maioria das extensões do BPP reside na função objetivo a minimizar.

No VLP assume-se que o item empacotado é, em seguida, transportado e, por isso, deve-se considerar uma série de restrições práticas de carregamento, as quais são listadas a seguir, com base em Wang *et al.* (2009), Muñoz (2011) e Bortfeldt e Wäsher (2013):

a) Restrições clássicas do BPP

- Restrição de sobreposição: os itens não podem estar sobrepostos uns com os outros.
- Restrição de conteúdo: os itens devem estar completamente contidos na superfície de carga/ veículo.

b) Restrição de capacidade: a soma do peso dos itens transportados não deve exceder a capacidade de carga dos veículos.

c) Restrição de ortogonalidade: cada item deve ser empacotado com suas arestas paralelas às arestas do veículo.

d) Restrição de orientação dos itens: os itens têm base e orientação fixas com relação à superfície de carregamento, de modo que não podem ser inclinados ou rotacionados em 90º em relação a qualquer eixo.

e) Restrição de fragilidade de carga: associa-se com as diferentes resistências à pressão exercida sobre os itens em caso de empilhamentos e, portanto limita determinados arranjos de carga. Os itens podem ser divididos em dois grupos: frágeis e não frágeis. No primeiro grupo os objetos não podem ser empilhados.

f) Restrição de estabilidade dos itens: quando um item é empilhado sobre outros, sua base deve estar apoiada sobre uma superfície mínima de suporte.

g) Restrição de carregamento sequencial (*Last in First Out* – LIFO): ao descarregar os itens de um cliente, nenhum item pertencente aos clientes atendidos posteriormente ao longo da rota devem ser movidos ou bloquear a retirada dos itens do cliente atual. Ou seja, os itens devem estar imediatamente adjacentes às portas traseiras do compartimento de carga, não sendo permitidos movimentos laterais de carga.

h) Restrição de balanceamento de carga (ou de distribuição de peso): a carga é arrumada de tal maneira que o peso dela é distribuído de forma mais uniforme possível em todo o piso do *bin*.

i) Otimização de manipulação: a manipulação da carga realizada nos locais de demanda possui um custo mínimo associado. Tal situação ocorre quando não se considera a restrição de sequenciamento. Neste caso, os itens podem ser manuseados em atendimentos prévios a sua entrega.

Em um problema de carregamento real não é preciso atender a todas essas restrições simultaneamente (WANG *et al.*, 2009). Algumas devem ser obrigatoriamente satisfeitas ("a" e "b", por exemplo) e outras podem ser apenas desejáveis. Ressalta-se que as restrições "e" e "f" são específicas para problemas de carregamento tridimensional.

Especificamente, no caso de carregamento bidimensional, no qual os itens têm duas dimensões associadas (largura e comprimento), tem-se como principais extensões (IORI e MARTELLO, 2010, 2013; DUHAMEL *et al.*, 2011; KHEBBACHE-HADJI *et al.*, 2013):

- Problema de Empacotamento em *Bins* Bidimensional (*Two-Dimensional Bin Packing Problem* – 2BPP)

  Consiste em minimizar o número de retângulos idênticos (*bins)* usados para empacotar um conjunto de itens retangulares menores. Segundo Gendrau *et al.* (2008), abordagens exatas para o 2BPP são geralmente baseadas em técnicas *branch-and-bound* e são capazes de resolver instâncias com até 100 itens.

- Problema de Empacotamento em Faixa Bidimensional (*Two-Dimensional Strip Packing Problem* – 2SPP)

  Consiste em empacotar um conjunto de itens retangulares dentro de uma faixa retangular com largura conhecida e altura infinita, de modo a minimizar a altura total na qual a faixa é usada.

No problema a ser estudado, o VLP tem os itens empacotados segundo o 2BPP.

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE PROBLEMAS DE ROTEAMENTO E CARREGAMENTO DE VEÍCULOS

A roteamento e o carregamento de veículos consistem em duas questões centrais na logística e a maioria dos problemas de otimização resultantes dessas duas áreas são *NP-hard* e extremamente difíceis de resolver na prática. Por esse motivo, essas duas áreas de pesquisa

têm sido tratadas separadamente, em detrimento da otimização global (IORI e MARTELLO, 2010).

De acordo com Iori *et al.* (2007) e Gendrau *et al*. (2008), há limitações relativas à aplicação separada dos dois problemas em contextos reais. Em geral, enquanto no VRP as demandas dos clientes são expressas por valores inteiros, representando o peso total dos itens a serem entregues, nas instâncias do mundo real, as demandas consistem em itens caracterizados tanto por peso quanto por forma. Sendo assim, ao passo que uma solução viável para o VRP requer apenas que a soma das demandas dos clientes atribuídos a cada veículo não exceda sua capacidade total de carga, nas operações de transporte, o carregamento dos produtos nos veículos pode representar um problema difícil, sobretudo, para itens de maior tamanho. Assim, o padrão de carregamento dos itens em cada veículo deve possibilitar uma solução para o problema de roteamento, pois o carregamento influencia fortemente na decisão de sequenciar os clientes ao longo das rotas.

Por essa necessidade de gerar modelos mais condizentes com a realidade, algoritmos integrando esses dois aspectos logísticos têm sido propostos recentemente na literatura (IORI e MARTELLO, 2010). Segundo Zachariadis *et al.* (2009), tal integração trata-se de uma nova variante do VRP. Ranck Júnior e Yanasse (2010) definem o problema com um VRP no qual se incluem restrições inerentes ao VLP. Se por um lado a combinação dos dois problemas aumenta a dificuldade combinatorial, por outro permite encontrar uma solução melhor que corresponda aos objetivos logísticos do mundo real (IORI e MARTELLO, 2010).

Existem cinco artigos de revisão da literatura sobre problemas integrados de roteamento e carregamento (WANG *et al.*, 2009; IORI e MARTELLO, 2010; RANCK JÚNIOR e YANASSE, 2010; IORI e MARTELLO, 2013; POLLARIS *et al.*, 2015).

Em seu artigo, Iori e Martello (2010) apresentaram a seguinte classificação para os problemas de roteamento com restrições de carregamento:

a) 2L-CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints*) ou Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Carregamento Bidimensional, introduzido por Iori *et al.* (2007). Neste caso, os itens demandados pelos clientes e a superfície de carregamento dos veículos são expressos em duas dimensões.

b) 3L-CVRP (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-dimensional Loading Constraints)* ou Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Carregamento

Tridimensional, introduzido por Gendrau *et al.* (2006). Neste problema consideram-se três dimensões tanto para os itens quanto para os veículos. Por isso, é necessário incluir restrições adicionais relativas à resistência e estabilidade da carga. Alguns dos principais representantes dessa categoria são: Moura (2008), Moura e Oliveira (2009), Tarantilis *et al.* (2009), Fuellerer *et al.* (2010), Bortfeldt (2012), Bortfeldt *et al.* (2013) e Junqueira *et al.*(2013).

c) MP-VRP (*Multi-Pile Vehicle Routing Problem)* ou Problema de Roteamento de Veículos de Múltiplas Pilhas, introduzido por Doerner *et al.* (2007), que adiciona ao VRP restrições de carregamento envolvendo problema de programação de máquinas paralelas. Tal problema surgiu de uma situação de transporte no mundo real enfrentado por uma empresa fornecedora de produtos de madeira. Cada cliente requer um mix de produtos tridimensionais que podem pertencer a duas categorias: compensados curtos e compensados longos. Todos os compensados de madeira da mesma categoria solicitados por um cliente são paletizados, produzindo assim paletes curtos e longos. Todos os itens têm a mesma largura W, igual à largura do veículo, e variados comprimento e altura. Enquanto a altura pode assumir qualquer valor entre 1 e H (a altura do veículo), os comprimentos só podem assumir o valor de L (isto é, o comprimento do veículo) para os itens longos, ou o valor de L/3 para os curtos. Os itens podem ser empilhados sobre os outros, produzindo pilhas. O comprimento da área de carregamento do veículo está subdividido em três setores de tamanho L/3, e cada item ocupa uma determinada altura de um ou três setores. O carregamento de cada veículo deve obedecer a uma restrição de sequenciamento. Outros autores relacionados ao tema são: Tricoire *et al*. (2011) e Massen *et al*. (2012).

d) MC-VRP (*Multi-compartments Vehicle Routing Problem)* ou Problema de Roteamento de Veículos com Carregamento em Multicompartimentos, em que veículos com múltiplos compartimentos permitem o transporte de produtos heterogêneos no mesmo veículo, mas em diferentes compartimentos. O MC-VRP possui aplicação prática no contexto industrial, sobretudo, na indústria naval e na entrega em terra de produtos petrolíferos. Podem ser encontradas na literatura publicações relativas à distribuição de petróleo (BROWN E GRAVES, 1981; CORNILLIER *et al.*, 2012), à distribuição de comida (CHAJAKIS e GUIGNARD, 2003) e recolhimento de resíduos (MUYLDERMANS e PANG, 2010).

e) TSPPD (*Traveling Salesman Problem with Pickup and Delivery and Loading Constraints)* ou Problema do Caixeiro Viajante com Restrições de Coleta e Entrega e Carregamento, que inclui três subdivisões: o TSP-PDL (*TSPPD with LIFO Loading),* o TSP-PDF (*TSPPD with FIFO Loading)* e o DTSPMS (*Double Traveling Salesman Problem with multiple stacks)*.

O enfoque deste trabalho é o problema 2L-CVRP que será abordado em maior detalhe na próxima seção.

2.4.1 Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Carregamento em Duas Dimensões

No transporte, muitas vezes, é necessário lidar com itens que não podem ser empilhados, devido à sua fragilidade ou peso, como, por exemplo, eletrodomésticos e componentes mecânicos. Nesta situação, o CVRP deve conter restrições adicionais que reflitam o aspecto de carregamento bidimensional do problema (GENDRAU *et al.,* 2008). Nesse sentido, tem-se o 2L-CVRP, que é uma combinação de dois problemas *NP-hard*: o problema de roteamento de veículos capacitados (*Capacitated Vehicle Routing Problem* - CVRP), e o problema de empacotamento de caixas bidimensionais (*Two-dimensional Bin Packing Problem* – 2BPP) (LEUNG *et al.,* 2011). Tais problemas consistem em um dos dois mais importantes aspectos de distribuição física, que são o carregamento de cargas dentro de veículos e a posterior roteamento dos veículos para satisfazer às demandas de clientes (LEUNG *et al.,* 2010).

No 2L-CVRP, os clientes demandam a entrega de um conjunto de itens retangulares, que serão transportados por veículos com uma dada capacidade de peso e uma superfície de carregamento de duas dimensões. Tais itens possuem tamanhos e pesos determinados e não podem ser empilhados. Todos os itens de um dado cliente devem ser atribuídos a um único veículo. Todos os veículos, por sua vez, devem começar e terminar no depósito central e os itens transportados devem possuir uma arrumação viável dentro da superfície de carregamento desses veículos. O objetivo do problema é arrumar os itens dentro dos veículos e entregá-los aos clientes, por meio de uma rede de transportes, com mínimo custo total (IORI *et al.,* 2007*;* FUELLERER *et al.,* 2009; LEUNG *et al.,* 2010).

O 2L-CVRP pode ser descrito da seguinte maneira (IORI *et al.,* 2007*;* GENDRAU *et al.,* 2008; ZACHARIADIS *et al.,* 2009; FUELLERER *et al.,* 2009; AZEVEDO *et al.,* 2009;

ARAUJO, 2010; LEUNG *et al.* 2010; LEUNG *et al.*, 2011; DUHAMEL *et al.*, 2011; ZACHARIADIS *et al.*, 2013) :

Dado um grafo não orientado completo $G = (V, E)$, em que $V = \{0\} \cup V_c$ é o conjunto de $n + 1$ vértices, correspondendo ao depósito central (vértice 0), e n clientes ($V_c = \{1,2, \dots, n\}$), e $E = \{e_{ij} | i, j = 0,1, \dots, n \quad e \quad i \neq j\}$ é o conjunto de arcos (i, j) entre um par de vértices. Associado a cada arco e_{ij}, há um custo c_{ij}, que é o custo de transporte, ou seja, o custo de viagem de i para j. Além disso, há um conjunto de K veículos idênticos disponíveis no depósito, caracterizados por uma capacidade de peso D e uma superfície retangular de carregamento de largura W e comprimento L. Cada veículo é acessível por apenas um único lado (parte traseira) para operações de carga e descarga. A área total da superfície de carregamento é denotada por $A = WL$. Seja $c_r(k)$ o custo total da rota k $(k = 1, \dots, K)$ e $S(k)$ o conjunto de clientes pertencentes a rota k. Cada cliente $i \in V_c$ tem um conjunto $I_i = \{1, 2, \dots, m_i\}$ de m_i itens retangulares, cujo peso total é d_i. Cada item $t_{ip} \in I_i$ $(p = 1, \dots, m_i)$ tem largura w_{ip} e comprimento l_{ip}. A área total dos itens demandados pelo cliente i é denotada por $a_i = \sum_{p \in I_i} w_{ip} l_{ip}$. . Por fim, tem-se que $M = \sum_{i \in V_c} m_i$ é o número total de itens.

O objetivo do 2L-CVRP é atribuir os clientes i a uma das rotas, $R_k, k = 1, 2, \dots, K$, tal que o custo de transporte total é minimizado, e que para cada rota exista um carregamento viável de itens dentro da superfície de carregamento do veículo.

No 2L-CVRP, o carregamento viável deve satisfazer as seguintes restrições:

a) O tamanho do conjunto de rotas geradas não deve exceder o número de veículos disponíveis (no máximo uma rota por veículo);
b) Cada rota começa e termina no depósito central;
c) Todos os clientes devem ser visitados apenas uma única vez;
d) O peso total de todos os itens em cada rota $R_k, k = 1, 2, \dots, K$,não deve exceder a capacidade do veículo, D, ou seja, $\sum_{i \in S} d_i \leq D$;
e) A demanda de cada cliente é totalmente satisfeita;
f) Agrupamento de itens: todos os itens de um dado cliente devem ser carregados em um mesmo veículo; em outras palavras, entregas fracionadas não são permitidas. Logo, para cada cliente i, assume-se que $d_i \leq D$ e que há um carregamento bidimensional viável de m_i itens dentro da superfície de um único veículo $(i = 0,1, \dots, n)$;
g) O carregamento deve ser *ortogonal*, ou seja, os itens devem ser carregados com seus lados paralelos aos lados da superfície de carregamento;

h) Todos os itens de cada cliente devem estar completamente contidos na superfície de carregamento do veículo. Representando-se a superfície de carregamento do veículo dentro do quadrante positivo do sistema cartesiano, em que o canto inferior esquerdo é a origem (0,0), a aresta W é paralela ao eixo x e a aresta L é paralela ao eixo y, tem-se que a posição do item t_{ip} é definida por duas variáveis x_{ip} e y_{ip}, que são as coordenadas do ponto inferior esquerdo. Além disso, considera-se a posição de carga e descarga de veículo como sendo o segmento $[(0, L), (W, L)]$. Dessa forma, tal restrição pode ser representada por: $0 \leq x_{ip} \leq W - w_{ip}$ e $0 \leq y_{ip} \leq L - l_{ip}$, $\forall\, i \in S$ e $p \in \{1, \dots, m_i\}$.

i) Não poderá ocorrer sobreposição de itens dentro da superfície de carregamento dos veículos, ou seja, $x_{ip} + w_{ip} \leq x_{ip'}$ ou $x_{ip'} + w_{ip'} \leq x_{ip}$ ou $y_{ip} + l_{ip} \leq y_{ip'}$ ou $y_{ip'} + l_{ip'} \leq y_{ip}$, $\forall\, i, j \in S$, $p \in \{1, \dots, m_i\}$, $p' \in \{1, \dots, m_j\}$ e $(i, p) \neq (j, p')$.

Além do conjunto de restrições mencionadas acima (a)-(i), há outros dois aspectos a serem considerados: um referente à possibilidade de reacomodar ou não a carga ao longo da rota e outro relativo à orientação do item, gerando novas terminologias para o problema.

No que tange ao primeiro ponto, há duas variantes: o 2L-CVRP *irrestrito* e o 2L-CVRP *sequencial*. No carregamento *irrestrito* a disposição dos itens é feita de modo a ter uma ocupação adequada do espaço de carga, sendo que reacomodações são permitidas ao longo da rota de forma a possibilitar a descarga. Em geral, este caso também corresponde a veículos que podem ser descarregados verticalmente com um guindaste (KHEBBACHE-HADJI *et al.*, 2013). Neste caso, nenhuma restrição é adicionada ao problema. No carregamento *sequencial* a disposição da carga no veículo deve obedecer à ordem inversa de descarga, análogo a um sistema LIFO (*last in – first out*). Neste caso, o 2L-CVRP deve satisfazer uma restrição adicional denominada restrição de carregamento sequencial ou de carregamento traseiro (*Sequential Loading or Rear Loading Constraint)*: o carregamento do veículo deve ser tal que quando o cliente $i \in S(k)$ é visitado, todos os itens correspondentes a este cliente devem ser descarregados por meio de uma sequencia de movimentos paralelos à dimensão do comprimento da superfície de carregamento. Ou seja, as operações de descarregamento são realizadas pela traseira do veículo e não podem gerar um rearranjo da carga sobre o veículo. Na prática, a restrição de sequência é comum por causa do peso ou fragilidade dos itens. Em outras palavras, enquanto se estiver descarregando itens de um cliente, nenhum item pertencente aos clientes sucessivos ao longo da rota pode ser movido ou bloquear a remoção

de itens do cliente atual (GENDRAU *et al.*, 2008; ZACHARIADIS *et al.*, 2009; FUELLERER *et al.*, 2009; ARAUJO, 2010; LEUNG *et al.*, 2011).

No que concerne à orientação do item, pode haver um carregamento *orientado* ou *não orientado*. Um carregamento *orientado* é aquele no qual os itens possuem uma orientação fixa, não podendo ser rotacionados porque, por exemplo, eles possuem dimensões muito grandes ou são muito pesados, com o peso não distribuído uniformemente. Já um carregamento *não orientado* é aquele em que os itens podem ser rotacionados em 90º (FUELLERER *et al.*, 2009).

Na literatura, Fuellerer *et al.* (2009) foram os primeiros a propor uma classificação de quatro categorias relacionada com a configuração do carregamento incluindo a possibilidade de rotacionar o item. A fim de padronizar e evitar conflitos entre as nomenclaturas utilizadas pelos pesquisadores desta área, Duhamel *et al.*(2011), baseados em Fuellerer *et al.* (2009), sugerem a notação $x|yz|L$, onde x representa a dimensão (duas ou três dimensões), y representa a restrição de ordenação dos itens (sequencial ou irrestrito) e z representa a orientação do item (orientado ou rotacionado). A partir disso, definem-se quatro classes de problemas bidimensionais (FUELLERER *et al.*, 2009; DUHAMEL *et al.*, 2011; ZACHARIADIS *et al.*, 2013):

- 2|SO|L: *two-dimensional sequential oriented loading* ou carregamento orientado sequencial bidimensional – esta classe inclui restrição de sequenciamento e os itens tem orientação fixa;

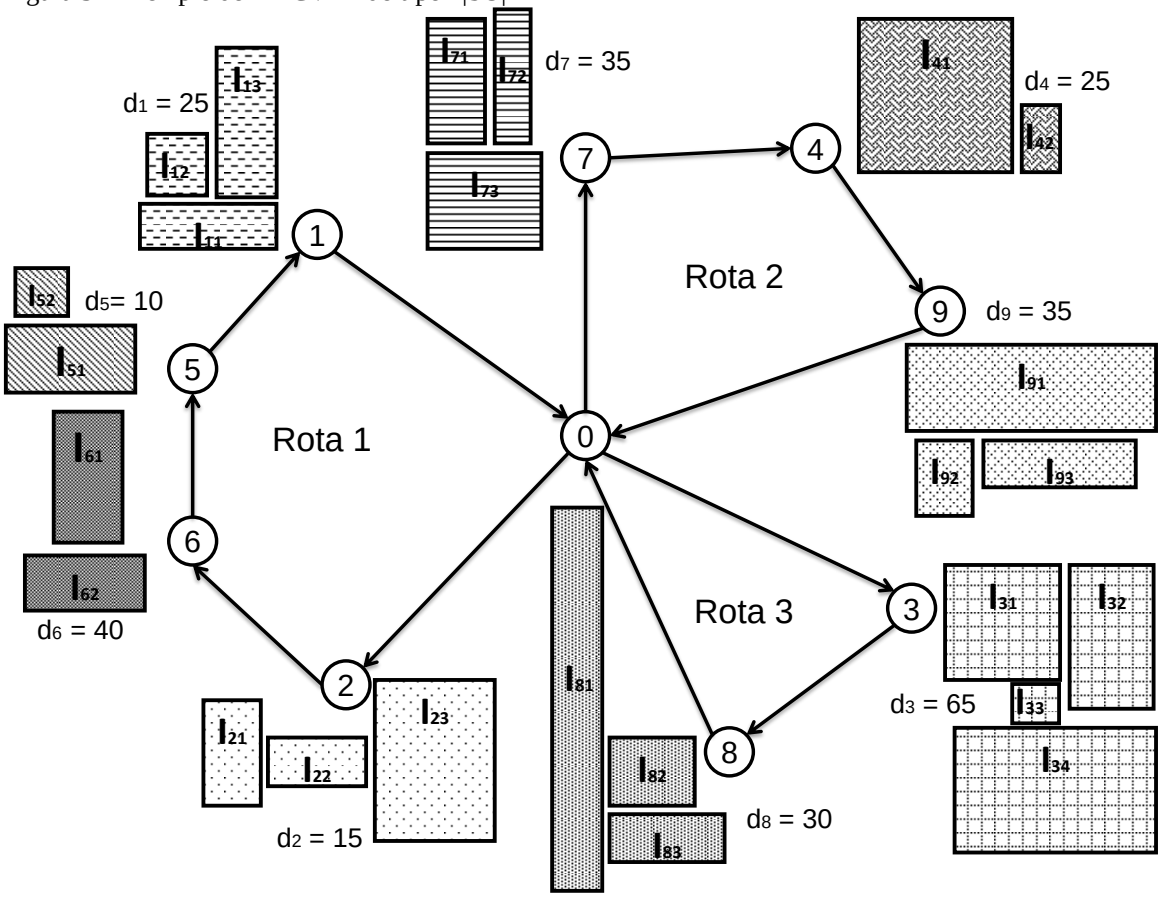
- 2|SR|L: *two-dimensional sequential rotated loading* ou carregamento rotacionado sequencial bidimensional – esta classe inclui restrição de sequenciamento e os itens podem ser rotacionados;

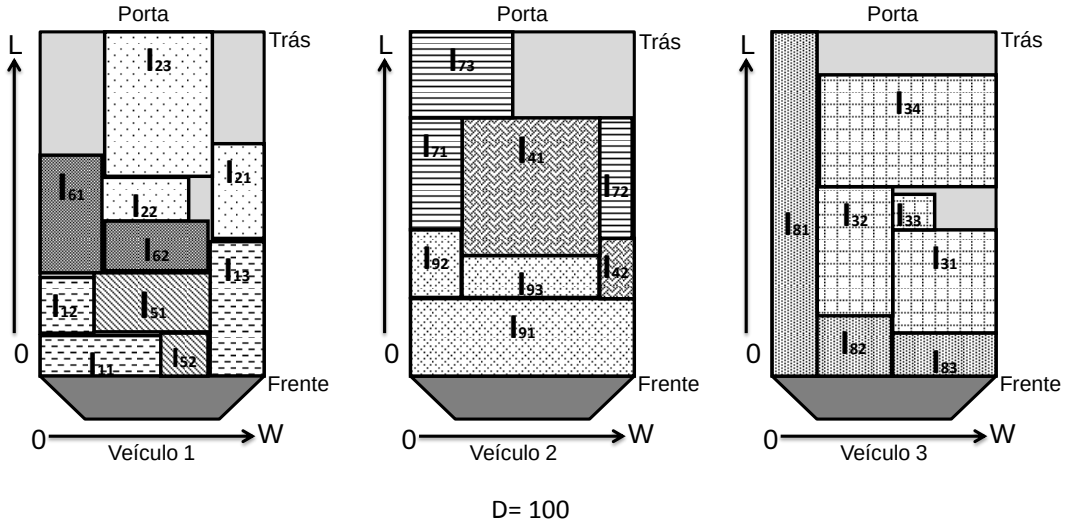
- 2|UO|L: *two-dimensional unrestricted oriented loading* ou carregamento orientado irrestrito bidimensional – esta classe não inclui restrição de sequenciamento e os itens tem orientação fixa;

- 2|UR|L: *two-dimensional unrestricted rotated loading* ou carregamento rotacionado irrestrito bidimensional – esta classe não inclui restrição de sequenciamento e os itens podem ser rotacionados;

A Figura 5 ilustra um exemplo de 2L-CVRP com três veículos de capacidade D=100, 9 clientes, e 25 itens. A superfície de carregamento dos veículos é representada dentro do primeiro quadrante do plano cartesiano, cuja origem (0,0) corresponde ao canto inferior esquerdo. Os itens de cada cliente são apresentados com o mesmo tipo de preenchimento e são denotados por I_{ip}, em que i representa o cliente ao qual eles pertencem e p identifica o item. Por exemplo, a notação I_{34} indica o item de nº 4 que pertence ao cliente 3. Além disso, as coordenadas do canto inferior esquerdo dos itens, x_{ip} e y_{ip} definem a posição na qual devem ser inseridos na superfície de carregamento. Na Figura 5, os três padrões representados para os veículos são carregamentos sequenciais orientados viáveis para a entrega de mercadorias.

Figura 5 - Exemplo do 2L-CVRP do tipo 2|SO|L

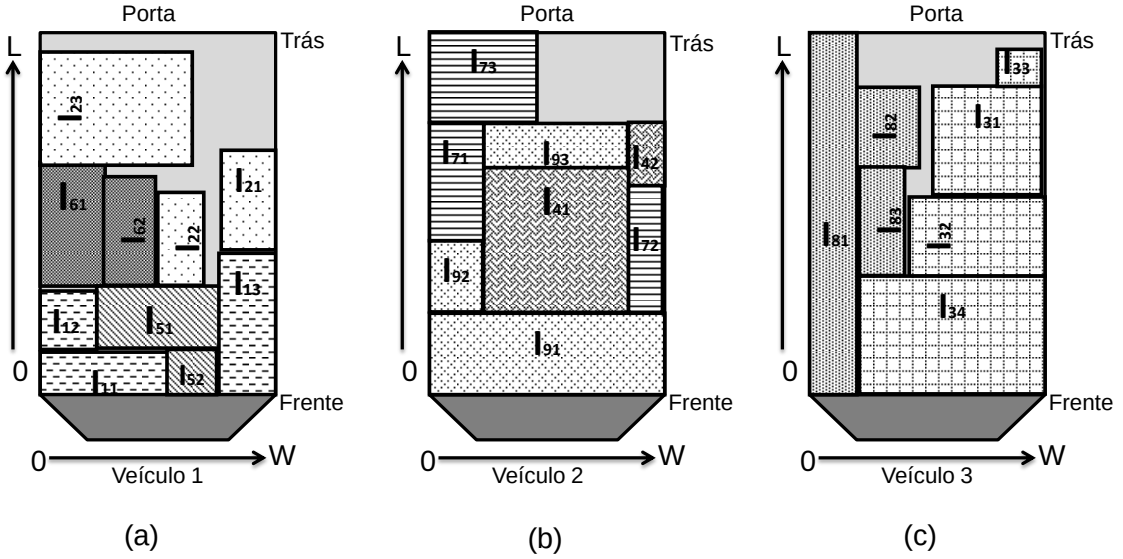




Fonte: Adaptado de Gendrau *et al*. (2008); Zachariadis *et al*. (2009); Azevedo *et al.* (2009); Iori e Martello (2010).

Considerando a mesma configuração de clientes, itens e rotas apresentada na Figura 5, mostram-se na Figura 6 os casos de 2|SR|L, 2|UO|L, 2|UR|L, respectivamente.

Figura 6 - Superfície de carregamento do veículo: (a) 2|SR|L; (b) 2|UO|L; (c) 2|UR|L.



Na Figura 6 (a), tem-se a rotação dos itens I_{22}, I_{23} e I_{62} e há a restrição de sequenciamento, de forma a atender os clientes da rota 0-2-6-5-1-0 sem haver necessidade de movimentar cargas dos clientes sucessores, configurando assim a classe 2|SR|L. Na Figura 6 (b), ilustra-se o caso 2|UO|L, no qual o carregamento é irrestrito, ou seja, não obedece à ordem de entrega aos clientes da rota 0-7-4-9-0 e os itens estão orientados. Nesta configuração, será necessário

reacomodar as cargas várias vezes: primeiro o item I_{42} deverá ser movido para a retirada do item I_{72}, que pertence ao cliente 7. Em seguida, todos os itens do cliente 4 deverão ser movidos para a retirada dos itens do cliente 9. Já a Figura 6 (c) mostra o 2|UR|L, no qual permite-se a rotação dos itens e não há restrição de sequenciamento. No caso apresentado, os itens I_{32}, I_{82} e I_{83} foram rotacionados e os itens I_{82} e I_{83} estão bloqueando a remoção do item I_{34} do cliente 3, que é o primeiro da rota (0-3-8-0), havendo necessidade de movimentação e reacomodação da carga.

2.4.1.1 Formulação do problema

O 2L-CRVP é modelado usando uma adaptação da formulação clássica de dois índices do CVRP de Toth e Vigo (2002b). Seja z_e uma variável binária para todo $e \in E$, que assume valor 1, se e somente se, uma veículo viaja ao longo do arco e em um rota viável, e zero caso contrário. Dado um subconjunto de clientes $S \subseteq V$, $d(S)$ é o peso total de todos os clientes em S, ou seja, $d(S) = \sum_{i \in S} d_i$. Denote por A a área da superfície de carregamento do veículo e $a(S)$ a área total dos itens dos clientes em S, ou seja, $a(S) = \sum_{i \in S} \sum_{p \in I_i} w_{ip} l_{ip}$. Seja $\delta(S)$ o conjunto de arcos em G com exatamente um vértice em S e seja $\gamma(S)$ o conjunto de arcos em G com ambos os vértices em S. Seja $r(S)$ o número mínimo de veículos necessários para suprir a demanda de S e K o número de veículos disponíveis. Além disso, dada uma rota viável (S, σ), denota-se por $E(S, \sigma)$ o conjunto de arcos em cada rota. Mais especificamente, $E(S, \sigma) = \{(0, \sigma(1)), (\sigma(1), \sigma(2)), \dots, (\sigma(|S|), 0)\}$. Por fim, denota-se por $\sum(S)$ a coleção de sequencias σ tal que (S, σ) é uma rota viável. A formulação da programação inteira é (IORI *et al.*, 2007):

$$\min \sum_{e \in E} c_e z_e \tag{10}$$

$$\sum_{e \in \delta(i)} z_e = 2 \qquad \forall\, i \in V \setminus \{0\} \tag{11}$$

$$\sum_{e \in \delta(0)} z_e = 2K \tag{12}$$

$$\sum_{e \in \delta(S)} z_e \geq 2r(S) \qquad \forall\, S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \tag{13}$$

$$\sum_{e \in E(S,\sigma)} z_e \leq |S| - 1 \qquad \forall\, (S,\sigma) \mid \sigma \notin \sum(S) \tag{14}$$

$$z_e \in \{0,1\} \qquad \forall\, e \in E \setminus \delta(0) \tag{15}$$

$$z_e \in \{0,1,2\} \qquad \forall\, e \in \delta(0) \tag{16}$$

A função objetivo expressa em (10) trata da minimização do custo de transporte. As restrições (11) garantem que cada cliente é visitado exatamente uma vez. As restrições (12) asseguram que exatamente K veículos são usados. As restrições representadas por (13), conhecidas como restrições de capacidade-corte, impõem tanto conectividade quanto viabilidade de solução com relação às condições expressas nos itens (g), (h), (i) da seção, ou seja, capacidade, respeito ao limite de espaço de carregamento e sobreposição de itens, respectivamente.

É importante observar que o cálculo de $r(S)$ é *NP-hard*, uma vez que equivale a encontrar a solução do problema do empacotamento de caixas bidimensional (2BPP), dados os itens dos clientes e uma superfície de carregamento dos veículos. Por isso, é usual na literatura substituir $r(S)$ por um limite inferior sobre o seu valor, o que é obtido por uma simples relaxação. Em geral, adota-se $r'(S) = \max\{\left\lceil\frac{d(S)}{D}\right\rceil, \left\lceil\frac{a(S)}{A}\right\rceil\}$, conhecidas como Desigualdades de Capacidade Arredondadas (*Rounded Capacity Inequalities*), em que o primeiro termo é o limite inferior contínuo do 1BPP associado com o peso dos itens dos clientes, e o segundo é o limite inferior contínuo do 2BPP relacionado com a área total ocupada pelos itens dos clientes em S. As restrições (14), conhecidas como restrições de caminho inviável (*infeasible-path constraints*), consideram os requisitos da sequência de carregamento, eliminando sequências σ não-viáveis associada com um conjunto de clientes S. Ressalta-se que tal restrição só será válida para problemas do tipo 2|SO|L e 2|SR|L, que contém a restrição de sequenciamento. Por fim as restrições (15) impõem que as variáveis associadas com os arcos que ligam dois clientes são binárias, e as restrições (16) estabelecem que as variáveis relacionadas com arcos que conectam os clientes ao depósito também podem assumir o valor dois (representando, assim, uma rota de um único cliente).

2.4.1.2 Revisão da Literatura sobre o 2L-CVRP e suas Variantes

O 2L-CVRP foi originalmente introduzido na literatura por Iori *et al*. (2007), que apresentaram um modelo de Programação Linear Inteira gerado a partir da adaptação do modelo clássico de CVRP de Toth e Vigo (2002b). No que tange ao método de solução para o 2L-CVRP, os autores propuseram uma abordagem exata para o problema, aplicando um algoritmo de *Branch-and-Cut* (B&C), para a minimização do custo de roteamento, e um algoritmo *Branch-and-Bound* (B&B) para a verificação da viabilidade de carregamento. Em relação ao algoritmo B&C, para lidar com as restrições de capacidade e corte do modelo, foram usados procedimentos heurísticos de separação adaptados de Naddef e Rinaldi (2002), considerando a área dos itens. No que diz respeito ao algoritmo B&B, os autores desenvolveram o *Check-2L*, que serve para avaliar a viabilidade de um padrão de carregamento. Neste algoritmo incluíram-se limites inferiores (*Lower Bounds* – LB) propostos por Martello e Vigo (1998) para o 2BPP e um procedimento heurístico baseado na abordagem *Bottom-Left* (BL) de Berkey e Wang (1987). O desempenho global da abordagem foi aprimorado pela utilização de heurísticas tanto para gerar uma solução inicial quanto para permitir a atualização da solução atual. Dessa forma, determinou-se um conjunto de rotas pelo uso da heurística de inserção sequencial paramétrica (*Parametric Sequential Insertion Heuristic)* que leva em conta tanto a minimização dos custos de roteamento quanto os critérios de inserção de empacotamento bidimensional. A rota obtida foi melhorada por um procedimento *2-Opt* e a viabilidade de carregamento foi verificada pelo procedimento *Check-2L*. Tais procedimentos heurísticos foram executados antes do algoritmo B&C e possibilitaram produzir a primeira solução viável do 2L-CVRP. Para testar a abordagem exata, Iori *et al.* (2007) criaram instâncias para o 2L-CVRP a partir do conjunto de instâncias de referência para o CVRP de Toth e Vigo (2002b). Essas instâncias incluem características do 2BPP, como a largura e comprimento da superfície de carregamento e dos itens de cada cliente, além dos parâmetros inerentes ao CVRP clássico, tais como capacidade dos veículos; pesos associados com a demanda de cada cliente; número de veículos e custos dos arcos, que são calculados pela distância euclidiana entre dois pontos. Considera-se que cada instância tem cinco classes, sendo que cada uma corresponde a uma forma diferente de gerar os itens associados a cada cliente. A primeira classe é equivalente à instância original do CVRP, na qual cada cliente tem apenas 1 item e todos itens têm ambas as dimensões iguais a 1. Para cada classe $r = 2, \dots, 5$ o número de itens gerados para cada cliente é um valor inteiro

uniformemente aleatório no intervalo $[1, r]$. Cada um dos itens possui uma forma, nomeadas *vertical* (o intervalo das larguras dos itens é maior que o intervalo dos comprimentos), *homogênea* (a largura e o comprimento dos itens são sorteados no mesmo intervalo) e *horizontal* (o intervalo dos comprimentos dos itens é maior que o intervalo de larguras). Os autores consideraram 12 instâncias para avaliar a abordagem, totalizando 60 exemplos. O algoritmo global é eficaz, apresentando um desempenho satisfatório para o 2L-CVRP, sendo capaz de resolver de forma otimizada instâncias com até 35 clientes e mais de 100 itens dentro de 24 horas de tempo de cálculo computacional.

Para lidar com instâncias de maior escala, Gendreau *et al*. (2008) propuseram a primeira abordagem de solução meta-heurística da literatura, que emprega *Tabu Search* (TS) de Glover (1986, 1989) para otimizar as características de roteamento, enquanto os padrões de carregamento viáveis foram identificados por meio de um procedimento heurístico baseado no *Touching Perimeter Algorithm* (TP) de Lodi *et al.* (1999). Os autores usaram a heurística GENI (*Generalized Insertion Procedure*) desenvolvida por Gendreau *et al.* (1992) para realocar os clientes. A vizinhança utilizada consiste em remover um cliente a partir de uma rota e inseri-lo em outra rota, otimizando ambas as rotas envolvidas no movimento. Para garantir a viabilidade do carregamento resolveu-se o problema de empacotamento em faixas bidimensionais. Para verificar se o carregamento é viável utilizaram-se limites inferiores, *Local Search* (LS) e B&B truncado. No algoritmo, soluções inviáveis, tanto em termos de peso e quanto de carregamento, são aceitas, mas atribuiu-se uma penalidade na função objetivo. O TS foi testado nas instâncias de referência de Iori (2005) e Iori *et al.* (2003, 2007) que criaram 16 instâncias (instâncias de tamanho pequeno), produzindo 80 instâncias do 2L-CVRP, resolvidas de modo exato pelo B&C. Os resultados gerados alcançaram a solução ótima em 33 de 58 casos, quando comparados às instâncias resolvidas otimamente. Além disso, os autores aplicaram o TS em um conjunto de 20 novas instâncias do 2L-CVRP (instâncias de tamanho maior), totalizando 100 exemplos, para os quais a solução ótima não era conhecida, conseguindo obter uma solução viável para todos os casos. Foram resolvidas instâncias com até 255 clientes e 786 itens. Tais instâncias, juntamente com as de Iori *et al.* (2003, 2007) constituem as *instâncias de referência* da literatura do 2L-CVRP. Adicionalmente, resolveu-se o 2L-CVRP irrestrito e sequencial com orientação fixa, 2|UO|L e 2|SO|L, respectivamente, e conseguiu-se notar que o acréscimo da restrição de sequenciamento produz um pequeno aumento no custo da solução.

Fuellerer *et al*. (2009) empregaram várias técnicas de empacotamento bidimensional (*Lower Bounds* – LB, *Bottom-Left Fill* – BLF, *Touching Perimeter Algorithm* – TP, *Local Search* – LS, *Truncated Branch-And-Bound* – B&B) para encontrar padrões de carregamento viáveis, combinadas com a meta-heurística *Ant Colony Optimization* (ACO), para a otimização global. Este foi o primeiro trabalho em que o 2L-CVRP com carregamento não orientado foi abordado e no qual as quatro versões do problema foram avaliadas. O algoritmo foi testado nas *instâncias de referência* do 2L-CVRP, e foi executado 10 vezes para cada uma. Para as primeiras 17 instâncias, que contém até 40 clientes e 127 itens (instâncias de tamanho pequeno), os autores mantiveram as mesmas circunstâncias de Iori *et al.* (2007), ou seja, não permitiram rotas com apenas um cliente e exatamente *k* veículos poderiam ser usados. Para este caso, considerou-se apenas o 2|SO|L, pois não havia resultados de referência exata para as outras versões. Os resultados obtidos pelo algoritmo foram comparados com aqueles obtidos pelo B&C de Iori *et al.* (2007) e pelo TS de Gendrau *et al.* (2008) e conseguiu-se obter um desempenho superior em relação à meta-heurística existente, alcançando a solução ótima em 46 de 58 casos e reduzindo o tempo de processamento em computador. Já para as instâncias de tamanho maior, com mais de 40 clientes e para as quais há apenas a solução meta-heurística disponível, os autores usaram custos reais nos arcos, permitiram um único cliente por rota e a utilização de menos de *k* veículos. Comparando-se com todas as 36 instâncias de Gendrau *et al.* (2008), o ACO gerou uma melhoria média de 3,65% na solução para a versão 2|SO|L. Para compensar a diferença de velocidade computacional entre os dois experimentos, Fuellerer *et al.* (2009) executaram sua abordagem meta-heurística em um tempo limite de 30 minutos, em contraste com o tempo de 1 hora do TS de Gendrau *et al.* (2008). Mesmo assim, o ACO apresentou um desempenho superior, tendo uma melhoria média de 2,56% para o 2|SO|L e de 3,20% para o 2|UO|L. Outra interessante contribuição deste artigo reside na avaliação do efeito das restrições de carregamento nos custos totais. Compararam-se os resultados da versão 2|SO|L com relação aos casos 2|SR|L, 2|UO|L e 2|UR|L. Observou-se que na média entre as 180 instâncias analisadas, cerca de 5% do custo total de transporte pode ser reduzido quando as restrições de sequenciamento e de orientação fixa são relaxadas. Nas versões 2|SR|L e 2|UO|L, em que se relaxa apenas uma das duas restrições, obteve-se uma redução de mais de 3% na função objetivo.

Zachariadis *et al.* (2009) apresentaram a meta-heurística *Guided Tabu Search* (GTS), que incorpora os fundamentos de *Tabu Search* (TS) e *Guided Local Search* (GLS), para solucionar os aspectos de roteamento do problema, e cinco heurísticas de empacotamento

para resolver os aspectos de carregamento: *Bottom-Left Fill (W-axis)* – BLF-W (CHAZELLE, 1983)*; Bottom-Left Fill (L-axis)* – BLF-L (CHAZELLE, 1983)*; Max Touching Perimeter heuristic* – MTP (LODI *et al.*, 1999) *; Max Touching Perimeter No Walls heuristic* – MTPNW (LODI *et al.*, 1999) e *Min Area Heuristic* – MAH. O algoritmo explora o espaço de soluções por meio do emprego de TS combinada com um mecanismo baseado nos princípios da GLS, que controla a função objetivo penalizando características de baixa qualidade presentes na solução atual. Este mecanismo induz a diversificação, e ajuda o processo de busca a cobrir vastas áreas do espaço de solução. Para acelerar o processo de busca, reduziram-se as vizinhanças exploradas, e usou-se uma estrutura de memória para gravar a informação sobre viabilidade de carregamento. Os autores consideraram as versões 2|SO|L e 2|UO|L e testaram a abordagem de solução no conjunto de *instâncias de referência*, obtendo várias novas soluções melhores, como, por exemplo, uma melhoria média de 1,84% nos valores de solução das classes 2-5 para a versão irrestrita do problema e de 1,62% para a versão sequencial.

Azevedo *et al*. (2009) apresentaram um algoritmo *Branch-and-Cut* (B&C) para o 2L-CVRP, sendo esta a segunda abordagem exata encontrada na literatura. Este trabalho difere-se do de Iori *et al*. (2007) pelo uso de diferentes famílias de desigualdades para o CVRP e de distintas estratégias de inserção. Foi proposta uma estratégia com ênfase na inserção de cortes usando cinco famílias de desigualdades do CVRP. Para analisar a viabilidade dos carregamentos utilizaram-se os seguintes algoritmos heurístico e exato, respectivamente: *Bottom Left Decreasing Width Heuristic* – BLDW de Baker *et al.* (1980) e *OneBin Algorithm* de Martello *et al.* (2000). Os autores consideraram as variantes 2|SO|L e 2|UO|L do problema. O B&B foi testado em algumas das *instâncias de referência*. Os resultados para o caso 2|SO|L mostraram redução do tempo computacional quando comparados com os valores gerados pelo método exato de Iori *et al.* (2007). Já versão 2|UO|L apresentou uma redução de custo de rota de 0,58% em média para todas as instâncias testadas. Os autores ainda testaram o algoritmo proposto usando a solução ótima como limitante superior, a fim de avaliar os possíveis benefícios em se implementar uma heurística primal para resolver o problema. Os resultados mostraram uma substancial melhora no desempenho do algoritmo, com uma redução do tempo de solução de 61,13%.

Strodl *et al.* (2010) utilizaram a meta-heurística V*ariable Neighborhood Search* (VNS) para solucionar a parte de roteamento do 2L-CVRP, incorporando um procedimento heurístico e outro exato para resolver o problema de empacotamento. O procedimento de solução consiste

em dois passos: em primeiro lugar uma solução inicial é estabelecida por meio de uma heurística de construção, em seguida, a VNS melhora a qualidade da solução. A solução inicial foi obtida pela heurística de Clarke e Wright (1964). No VNS três etapas são executadas no *loop* principal: *shaking*, *iterative improvement*, *move or not*. Na primeira, se utiliza o *cross-exchange operator* para perturbar a solução atual. Tal operador intercambia dois segmentos escolhidos aleatoriamente de duas rotas, mantendo suas orientações originais. Na segunda etapa, usa-se o procedimento *2-opt* como estratégia de melhoria, que determina o ótimo local. Na terceira etapa, decide-se se a solução global obtida é aceita como a atual ou não. O aspecto de empacotamento do problema foi solucionado em um procedimento de três passos. O primeiro passo consiste em verificar se alguns pré-requisitos gerais são ou não cumpridos. Tais requisitos referem-se às restrições de capacidade máxima do veículo em termos de peso e área ocupada. O segundo passo aplica a heurística TP. Se a heurística não encontra uma solução viável, então o terceiro passo, que consiste no método exato B&B, é executado. Além disso, quatro mecanismos diferentes de indexação (*Standart Template Library Map* – STL; STL *Map with Continued Branch-and-Bound*; *Multi-Level Extendible Hashing Scheme* – MLH; MLH *with Continued Branch-and-Bound*) são usados na estratégia de empacotamento para armazenar as soluções obtidas. Sendo assim, foram gerados cinco métodos: um que não inclui a estrutura de indexação e é usado como base de comparação e outros quatro referentes a cada um dos mecanismos de indexação. A meta-heurística desenvolvida foi testada para a versão 2|UO|L do problema nas *instâncias de referência* e os resultados foram comparados com o ACO de Fuellerer *et al.* (2009). Para cada um dos cinco métodos foi possível melhorar a solução obtida pelo ACO em algumas instâncias. Porém nenhum deles superou o ACO em todas as instâncias. O melhor desempenho foi obtido pelo método STL *Map with Continued Branch-And-Bound*, que foi melhor em 79 casos, pior em 58 e produziu a mesma solução em 43 casos. O método MLH *with Continued Branch-and-Bound* apresentou o pior desempenho, gerando uma solução pior que o ACO em 115 casos e melhorando apenas 27 casos.

Leung *et al.* (2010) apresentaram um algoritmo de *Simulated Annealing* (SA) para resolver tanto a versão 2|UO|L quanto a 2|SO|L do 2L-CVRP, ao mesmo tempo em que usaram um conjunto de heurísticas de empacotamento (as mesmas cinco propostas por Zachariadis *et al.*, 2009), além de uma nova, denominada *Max Fitness Value Heuristic* (MFVH), que efetua o cálculo de um valor de ajuste, para solucionar a componente de carregamento do problema. Para acelerar o algoritmo os autores usaram uma estrutura de memória que armazena os

carregamentos viáveis. O algoritmo proposto foi testado usando as *instâncias de referência* presentes na literatura (IORI *et al.*, 2007; GENDRAU *et al.*, 2008). Os autores compararam seus resultados com aqueles obtidos pelo TS de Gendrau *et. al.* (2008), pelo GTS de Zachariadis *et al.* (2009) e pelo ACO de Fuellerer *et al.* (2009). Para o 2L-CVRP irrestrito, o SA apresentou uma melhoria média de 3,19% em relação ao TS e de 1,38% em relação ao GTS, enquanto para o 2L-CVRP sequencial os percentuais de melhoria foram de 3,57% e de 2%, respectivamente. No que tange ao ACO, teve-se um desempenho melhor apenas para a versão sequencial do problema. Além disso, os autores comprovaram a eficácia da sexta heurística de empacotamento criada por eles.

Leung *et al.* (2011) propuseram a meta-heurística *Extended Guided Tabu Search* (EGTS), a qual incorpora as teorias de *Tabu Search* (TS), e *Extended Guided Local Search* (EGLS), que lida com o aspecto de roteamento do problema. Para resolver a componente de empacotamento do problema, os autores modificaram a coleção de heurísticas de empacotamento desenvolvidas por Zachariadis *et al.* (2009) por meio da adição de uma nova heurística (H_6 – *Lowest Reference Line Best-Fit Heuristic* – LBFH) para resolver as restrições de carregamento no 2L-CVRP. A solução inicial é construída via uma estratégia gulosa: primeiramente, classificam-se os clientes por ordem decrescente da área total de seus itens e geram-se k rotas; depois os clientes são atribuídos a rotas viáveis que minimizam a área livre da superfície de carregamento do veículo, e são inseridos em pontos da rota de menor custo; se durante esse processo o cliente i não for atribuído a nenhuma rota, a posição dele é modificada, por meio da seleção estocástica de outro cliente atribuído a outra rota, trocando a posição com o cliente i. O método foi testado nas *instâncias de referência* para o 2|SO|L e o 2|UO|L e provou sua capacidade para melhorar os resultados da maioria dos casos solucionados pelo GTS de Zachariadis *et al*. (2009).

Duhamel *et al.* (2011) propuseram um algoritmo GRASP x ELS que consiste em uma combinação de uma meta-heurística *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) com *Evolutionary Local Search* (ELS), para solucionar o 2L-CVRP. Primeiramente, as restrições de empacotamento são transformadas, por meio de relaxação, em restrições de um problema de programação de projeto de recursos limitados (*Resource Constrained Project Scheduling Problem* – RCPSP). Em seguida, o problema relaxado é resolvido usando a estrutura GRASP x ELS. As soluções iniciais do problema de roteamento foram obtidas pelo uso da heurística de Clarke e Wright (1964) e de três heurísticas Golden *et al.* (1983), sendo elas aplicadas iterativamente nessa ordem: *Randomized Clarke and Write*

(RCM), *Path Scanning* (PS), *Randomized Path Scanning* (RPS) e *Random Generation* (RS). Ao final da execução do algoritmo proposto, a solução é novamente transformada em uma solução 2L-CVRP, empacotando os itens dentro dos veículos. Para verificar a eficiência da heurística de empacotamento, os autores compararam o desempenho desta com os resultados de dois métodos exatos: uma formulação de Programação Inteira Mista proposta por Pisinger e Sigurd (2003), solucionada com CPLEX 11.0, e um B&B desenvolvido por Martello *et al.* (2007), obtendo, em relação a ambas, melhor desempenho em termos de tempo. Esta é uma abordagem inovadora na literatura, para a qual apenas a versão irrestrita do 2L-CVRP (2|UO|L) foi resolvida. O algoritmo foi testado usando as *instâncias de referência* e comparado com os resultados de Gendrau *et al.* (2008), Zachariadis *et al.* (2009) e Fuellerer *et al.* (2009), e conseguiu obter melhor desempenho tanto em termos de redução de custo quanto de tempo de execução.

Shen e Murata (2012) resolveram o 2L-CVRP usando *Genetic Algorithm* (GA). Contudo tais autores trataram o problema de uma maneira diferente do que até então havia sido apresentado na literatura. Considerou-se que o veículo sai vazio do depósito e coleta os itens dos clientes ao longo da rota. Quando o veículo está carregado tanto em termos de peso quando de espaço, retorna ao depósito e é descarregado. Então, novamente este veículo faz uma nova rota, coletando itens de outros clientes. Para solucionar o aspecto de empacotamento, optou-se pela heurística *Bottom-Left.* Os autores utilizaram o LINGO para resolver a Programação Inteira Mista do problema e compará-lo com os resultados obtidos via algoritmo genético. Alcançou-se uma solução viável, apesar de diferenças percentuais em relação à ótima e conseguiu-se reduzir substancialmente o tempo de cálculo para instâncias menores. Foi possível calcular instâncias com até 100 clientes e 273 itens. Não há comparações com os resultados de referência existentes na literatura.

Zachariadis *et al*. (2013) propuseram uma meta-heurística denominada *Promise Routing-Memory Packing* (PRMP) cujo diferencial reside na sua estrutura compacta e no fato de que apenas dois parâmetros afetam o desempenho do algoritmo, o que ajuda na redução do tempo computacional. Pode-se afirmar que a meta-heurística proposta apresenta quatro elementos fundamentais: o controle da busca global pelo uso de uma nova variante do *promises concept* que depende de apenas um único parâmetro; o desempenho eficaz da busca local usando o conceito de *Static Move Descriptor* (SMD*)* para codificar os movimentos da busca local estaticamente; o uso de estruturas de filas prioritárias especiais (*Fibonacci Heaps*) para eliminar buscas por viabilidade de carregamento improdutiva; o emprego de vários

componentes de memória para eliminar investigações redundantes de carregamentos viáveis. Para otimizar os aspectos de roteamento, os autores usaram um método de *Local Search* (LS), coordenado via uma política de parâmetro único o qual se adapta ao progresso da busca conduzida. O método de busca local emprega três operadores quadráticos: *1-0 Exchange* (realocação de clientes), *1-1 Exchange* (permuta de cliente), *2-opt* (cruzamento de rota); Em relação às restrições de carregamento, utilizou-se uma heurística de empacotamento, cujo comportamento é controlado por um mecanismo de memória inovador que tem como objetivo gerar diversas estruturas de empacotamento a fim de maximizar a probabilidade de obter padrões de carregamento viáveis. Além disso, outra ideia incorporada no método de empacotamento foi a de que não há uma ordem predeterminada para inserir os itens em cada tentativa, que são colocados em qualquer posição de carregamento disponível. Os autores consideraram as categorias 2|UO|L e 2|SO|L e testaram o algoritmo nas *instâncias de referência*, produzindo resultados de boa qualidade, com melhoria em relação às melhores soluções conhecidas. Para as instâncias de CVRP, quando os resultados são comparados com a melhor solução obtida entre o EGTS + LBFH de Leung *et al.* (2011), ACO de Fuellerer *et al.* (2009), GRASPxELS de Duhamel *et al.* (2011), os autores obtiveram uma melhoria no custo médio da solução de 0,07%. Já para a versão 2|UO|L a melhoria média foi de 0,57% , enquanto para o 2|SO|L de 1,21%.

Bin *et al.* (2013) apresentaram a meta-heurística A*rtificial Bee Colony Algorithm* (ABC) e três heurísticas de empacotamento (BLF, MTP e LBFH) para resolver o 2L-CVRP. O ABC é uma técnica de inteligência de enxame inspirada pelo comportamento de busca de recursos alimentares das abelhas, e foi introduzido por Karaboga (2007, 2008). O algoritmo proposto possui três etapas principais: a representação da solução e métodos de decodificação, que inclui ao final um processo de verificação de viabilidade; procedimento de busca local para o aspecto de roteamento, que usa operadores de busca local (2-opt e 3-opt) para melhorar a solução anterior; algoritmos para carregamento bidimensional, que contém as três heurísticas de empacotamento supracitadas. Os autores adotaram a mesma estratégia gulosa de Leung *et al.* (2011) para a construção da solução inicial. A meta-heurística foi testada para as quatro versões do problema (2|SO|L, 2|SR|L, 2|UO|L e 2|UR|L) em 10 das *instâncias de referência*, que englobam até 100 clientes e 310 itens. Os resultados do ABC proposto foram comparados com o TS de Gendrau *et al.* (2008), o GTS de Zachariadis *et al.* (2009) e o EGTS de Leung *et al*. (2011), para as versões 2|SO|L e 2|UO|L, obtendo uma melhoria média de 1,93% , 1,88% e

1,13%, respectivamente, para o problema sequencial, enquanto para a variante irrestrita esses valores são 1,83%, 1,81% e 1,15%.

Dominguez *et al.* (2014a) apresentaram uma Programação Linear Inteira para o 2L-CVRP e propuseram a meta-heurística M*ultistart Biased-Randomized Algorith* (MS-BR) para resolver as versões 2|UO|L e 2|UR|L do problema. O algoritmo usa a abordagem *multistart* para evitar o mínimo local, já que os pontos de partida são selecionados aleatoriamente, e também para tornar-se mais facilmente paralelizável e reduzir o número de parâmetros. O MS-BR utiliza a randomização tendenciosa nas heurísticas clássicas, transformando um procedimento determinístico em um algoritmo probabilístico *multistart* sem perder a lógica por trás da heurística (JUAN *et al.*, 2011a). Especificamente para o aspecto de roteamento empregou-se uma versão aprimorada e randomizada aleatoriamente da heurística de economias de Clarke e Write (1964). Esta versão randomizada usa uma distribuição pseudogeométrica apresentada em Juan *et al.* (2010). Além disso, utilizaram-se estratégias baseadas em memória e fracionamento descritas em Juan *et al*. (2011b), que consistem em processos de busca local (*cache and splitting techniques)*. Durante o processo de construção da solução, o algoritmo verifica as condições de viabilidade em termos de capacidade e de empacotamento. Em relação à restrição de empacotamento, o algoritmo aplica uma versão adaptada da *Best-Fit Packing Heuristic* (BFP) de Burke *et al.* (2004). É importante observar que esta foi a primeira abordagem da literatura que integra o processo de empacotamento como parte do procedimento de construção da rota. O MS-BR foi testado nas *instâncias de referência*. Os resultados foram comparados com o ACO de Fuellerer *et al.* (2009) para a variante 2|UR|L, mostrando um desempenho ligeiramente melhor; e com o EGTS de Leung *et al*. (2011), SA de Leung *et al*. (2010), ACO de Fuellerer *et al.* (2009) e GRASPxELS de Duhamel *et al.* (2011) para a versão 2|UO|L, obtendo os menores *gaps* médios em relação às melhores soluções conhecidas.

Abdal-Hammed *et al.* (2014) propuseram a meta-heurítica *Large Neighborhood Search* (LNS) para resolver a versão 2|UO|L do 2L-CVRP. O LNS é aplicado tanto para resolver o aspecto de roteamento quanto o de carregamento. O método proposto considera um procedimento de solução de duas fases: a primeira fase gera uma ordem de colocação e aplica a estratégia *Bottom Left* a fim de empacotar os itens no veículo e, na segunda fase procura-se chegar a uma rota viável. O LNS foi testado no conjunto de vinte primeiras *instâncias de referência* de Gendreau *et al.* (2008), o qual contém instâncias de média escala, cujo número de clientes varia de 15 a 171 e a quantidade de itens varia de 24 a 226. Os resultados foram

comparados com aqueles obtidos pelo GRASPxELS de Duhamel *et al.* (2011) para as classes de 2 a 5. Segundo os resultados numéricos, o LNS apresentou um melhor desempenho em cerca de 20% dos casos avaliados em relação à solução obtida por Duhamel et al. (2011).

Wei *et al.* (2015) desenvolveram uma meta-heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) para tratar o aspecto de roteamento e incorporaram uma heurística *Skyline* adaptada a fim de resolver a componente de carregamento do 2L-CVRP. Além disso, os autores utilizaram uma estrutura de dados denominada *Trie* para armazenar as informações sobre carregamentos viáveis de cada rota e controlar o esforço computacional para avaliar a viabilidade do carregamento. Foram efetuados experimentos computacionais utilizando as *instâncias de referência* para solucionar as versões 2|UO|L e 2|SO|L do problema. A solução obtida pelo VNS foi comparada com os melhores valores obtidos entre ACO de Fuellerer *et al.* (2009), SA de Leung *et al.* (2010), EGTS + LBFH de Leung *et al.* (2011), GRASP x ELS de Duhamel *et al.* (2011) e PRMP de Zachariadis *et al.* (2013). O VNS alcançou melhorias em relação às melhores soluções conhecidas de 0,05 a 0,53% para a versão 2|UO|L e de no mínimo de 0,58% para a versão 2|SO|L. A meta-heurística proposta encontrou melhores soluções para 65 instâncias do 2L-CVRP irrestrito e 88 instâncias do 2L-CVRP sequencial de um total de 144.

Algumas variantes do 2L-CVRP também tem sido analisadas na literatura recente, que incluem desde a incorporação de variações clássicas relevantes do VRP, como coleta e entrega, janelas de tempo e frota heterogênea, como também diversificações em relação ao aspecto de carregamento.

Neste sentido, Malapert *et al.* (2008) apresentaram o problema de roteamento de veículos com coleta e entrega com restrições de carregamento bidimensional (*Two-Dimensional Pickup and Delivery Routing Problem with Loading Constraints* – 2L-PDP). Os autores formularam um modelo baseado em programação com uma interface de roteamento e uma restrição global que lida com a restrição de carregamento sequencial, examinando a extensão de coleta e entrega do 2L- CVRP. O objetivo é detectar o carregamento inviável o mais rápido possível, para escapar das regiões de inviabilidade no espaço de busca. O modelo utiliza limites inferiores, restrições de programação, restrições redundantes, restrição de capacidade e restrição de carregamento sequencial. As restrições de programação usam a noção de tarefas e recursos. O modelo usa um par de tarefas para representar a origem e as dimensões de um item. As rotas também são representadas por um conjunto de tarefas que permitem adicionar restrições de programação (precedência, janela de tempo,...) em/ou entre clientes. Os autores,

no entanto, não apresentaram testes com *instâncias de referência* e não obtiveram sucesso ao aplicar a heurística BLF. Logo, o problema com coleta e entrega não foi solucionado.

Muñoz (2011) apresentou uma nova modelagem para o 2L-CVRP, denotado por 2L-CVRP-H (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints and Handling Costs*), cuja função objetivo minimiza, além dos custos de roteamento, os custos de manipular os itens no local de demanda, o que é diferente de todas as propostas até então publicadas. A resolução da formulação proposta consiste em uma meta-heurística de três etapas: roteamento, na qual se utiliza uma adaptação da heurística de C&W; empacotamento, em que se aplica a heurística de *Floor-Ceiling* (FC); e otimização, que amplia a gama de instâncias que podem ser resolvidas de maneira eficiente. O modelo de programação inteira mista (MIP) foi testado sem aplicar algoritmos de solução inicial em 15 instâncias arbitrárias criadas aleatoriamente e apresenta um bom desempenho sobre instâncias de pequena escala, conseguindo resolver de modo exato instâncias de até 6 clientes, 10 itens e 2 veículos, em um tempo médio de 10 minutos. Por outro lado, o processo heurístico foi testado no conjunto de *instâncias de referência* da literatura e conseguiu resolver instâncias de até 20 clientes, 60 itens e 5 veículos em menos de 30 minutos.

Hamdi-Dhaoui *et al.* (2012) propuseram uma meta-heurística *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA –II) para resolver o problema de roteamento de veículos com restrições de carregamento bidimensional e conflitos parciais (*Two-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem with Partial Conflicts* – 2LPC-CVRP) e um *Path Relinking* (PR), proposto por Glover (1997), permite a melhoria da qualidade da solução obtida. Neste caso, os autores realizaram um estudo biobjetivo, dentro do qual se considera a minimização do custo de transporte bem como o equilíbrio da carga, minimizando a diferença em termos de superfície ocupada entre a rota mais carregada e a rota menos carregada. Para os aspectos de empacotamento foi aplicada a heurística *Bottom-Left Fill* adaptada. A solução inicial foi obtida pela heurística de C&W. O algoritmo proposto foi testado nas *instâncias de referência* para a versão 2|SO|L do problema, mas os resultados não foram comparados com aqueles obtidos na literatura. Foi o primeiro artigo desta categoria a abordar equilíbrio de carga.

Leung *et al.* (2013) abordaram o problema de roteamento de frota heterogênea de veículos de carregamento bidimensional (*Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* – 2L-HFVRP), uma nova variante do problema roteamento de veículos e que, até então, não havia sido tratada na literatura. Neste problema, a frota é composta por veículos com diferentes atributos (capacidades, custos operacionais fixos e variáveis,

comprimento e largura e as restrições de carregamento bidimensionais) e o número de veículos disponíveis é ilimitado. O objetivo é minimizar o custo de transporte das rotas designadas com relação à distância percorrida e custos fixos e variáveis associados aos veículos. Neste artigo, foi proposta a meta-heurística híbrida *Simulated Annealing with Heuristic Local Search* (SA_HLS). Para resolver as restrições de carregamento do 2L-HFVRP, associou-se ao SA_HLS seis heurísticas de empacotamento: as cinco desenvolvidas por Zachariadis *et al.* (2009) e a de Leung *et al.* (2010). Para acelerar o processo de busca, uma estrutura de dados foi usada para gravar a informação relacionada à viabilidade do carregamento. O desempenho do SA_HLS foi testado em *instâncias de referência* do 2L-CVRP para as versões 2|SO|L e 2|UO|L e os resultados foram comparados com os algoritmos propostos por Zachariadis *et al.* (2009), Fuellerer *et al.* (2009) e Duhamel *et al.* (2011). Obteve-se o melhor desempenho médio somente em relação ao GTS de Zachariadis *et al.* (2009) para ambas as versões.

Khebbache-Hadji *et al.* (2013) trataram do 2L-CVRP com janela de tempo (*Two-Dimensional Loading Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* – 2L-CVRPTW). Os autores apresentaram um modelo de Programação Não-Linear Inteira Mista para o problema e propuseram seis heurísticas, advindas da combinação de duas heurísticas para solucionar o VRPTW e três para empacotar itens dentro de veículo, além da meta-heurística *Memetic Algorithm* (MA) para a resolução do 2L-CVRPTW. No que se refere às duas heurísticas de roteamento, tem-se: S*equential Insertion Heuristic* (SIH) de Solomon (1987) e *Parallel Insertion Heuristic* (PIH) de Potvin e Rousseau (1995). Já em relação às três heurísticas de empacotamento, utiliza-se: C*onstructive Algorithm of Alvarez-Valdez* (CAV) de Alvarez-Valdez *et al*. (2005), M*aximum Touching Perimeter* (MTP) de Lodi *et al.* (1999) e S*helf Heuristic Filling Method* (SHF) de Ben Messaoud (2004). Os resultados dessas seis heurísticas combinadas foram usados como solução inicial do MA, o qual incorpora algoritmos evolucionários com procedimentos de busca local. As heurísticas e o MA foram testados em 16 das 36 *instâncias de referência* de Gendrau *et al.*(2008), adicionando a restrição de janela de tempo, resultando em um total de 144 instâncias que contêm até 255 clientes e 786 itens. Neste caso, os itens não podem ser rotacionados e não se consideraram as restrições de sequenciamento, abordando apenas o caso 2|UO|L. De acordo com os resultados, na média, a pior combinação foi a obtida com a heurística CAV para todas as classes, enquanto a melhor foi com a heurística MTP. No que diz respeito ao MA, foram

obtidos melhores resultados em comparação com as heurísticas, apesar de o tempo de execução ter sido maior.

Côté *et al.* (2013) abordaram o problema de roteamento de veículos com itens bidimensionais estocásticos (*Vehicle Routing with Stochastic Two-Dimensional Items* – S2L-CVRP). Neste problema, os pesos e as dimensões de alguns itens são caracterizados por uma distribuição probabilística discreta, já que, na prática, ao planejar uma rota de entregas nem sempre é possível saber todos os atributos dos objetos demandados pelos clientes. Em geral, tais características tornam-se conhecidas apenas antes da partida dos veículos, no momento de carregar os itens. Por isso, é possível que nem todos os objetos atribuídos a um determinado veículo na solução planejada possam ser carregados nele, e, neste caso, o item será deixado no depósito, gerando uma penalidade ou custo recursivo com base nos clientes não atendidos. Os autores, que foram os primeiros na literatura a considerar estocasticidade na demanda para o 2L-CVRP, propuseram uma modelagem matemática, cuja função objetivo é minimizar os custos de roteamento e os custos recursivos esperados. Tal formulação se baseia no conceito de *priori optimization* de Bertsimas *et al.* (1990), sendo resolvida em dois estágios. No primeiro, a rota planejada é construída, com desconhecimento dos tamanhos exatos dos itens. No segundo, os atributos tornam-se conhecidos e aplica-se a política de custos recursivos caso algum item não seja carregado. Para a resolução, utilizou-se o método *L-shaped* inteiro de Laporte e Louveaux (1993), que é um algoritmo B&C em que a componente expectativa do objetivo é linearmente limitada com cortes de otimalidade. Algumas desigualdades e limites inferiores foram propostos, como, por exemplo, o D*isaggregated Lower Bounding Functionals* (LBFs), denominado de *L-cuts* pelos autores. O método desenvolvido apenas para a versão 2|SO|L, foi testado, via CPLEX 12.5, nas *instâncias de referência* para o caso determinístico, conseguindo obter uma melhor tempo de resolução e solucionar instâncias com até 71 clientes e 226 itens. Já para o caso estocástico, com base nas instâncias supracitadas, os autores geraram instâncias específicas, resolvendo dentro de tempo de duas horas instâncias com até 44 clientes.

Martínez e Amaya (2013) apresentaram um problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, múltiplas viagens, e restrições de carregamento bidimensionais de itens circulares (*Vehicle Routing Problem with Multi-Trips, Time Windows and Two-Dimensional Circular Loading Constraints* – VRPM-TW-CL). Foi a primeira vez na literatura em que se realizou um estudo de caso envolvendo esse tema: trata-se de um problema real vivenciado por uma empresa que produz e entrega um tipo de comida conhecida como *Spanish Paella*, a qual é

entregue aos clientes em uma panela denominada *Paellera*, que tem formato circular. Uma Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), que tem como função objetivo a minimização do tempo total de viagem, foi proposta para lidar com problemas de pequena escala. O PNLIM foi linearizado utilizando limites superiores (*Upper Bounds* – UB), que transformaram as restrições não lineares de sobreposição dos itens circulares em restrições lineares de itens quadrados; e limites inferiores (*Lower Bounds* – LB), que modificaram as restrições de sobreposição em restrições de área máxima que pode ser ocupada pelos itens circulares em cada veículo. Para resolver problemas de tamanho real, os autores propuseram um método heurístico de duas etapas: a primeira constrói a solução inicial por meio da modificação da heurística *Solomon I1 Sequential Insertion Heuristic* (SI1SIH) feita por Dullaert e Bräysy (2003), e a segunda etapa melhora a solução inicial por meio de um *Tabu Search* (TS). Em ambas as etapas, os problemas relacionados ao empacotamento de círculos de diferentes tamanhos foram solucionados com as heurísticas *Stable* e *Wallpack* de George *et al.* (1995) e o empacotamento em caixas foi resolvido com o uso da heurística *Best Fit Decreasing Heuristic* (BFD) de Johnson *et al.* (1974). A fim de avaliar os limites superiores e inferiores do modelo matemático desenvolvido, executaram-se experimentos computacionais no *software Xpress-IVE* para um conjunto de 19 instâncias reais com 6 a 17 clientes, obtendo-se uma solução ótima para 15 delas. Ou seja, em 15 de 19 casos, a função objetivo do UB foi igual à do LB. O método heurístico proposto foi testado em dois grupos de instâncias diferentes: o primeiro correspondia aos dados reais da empresa analisada; o segundo foi criado a partir das *instâncias de referência*, adicionando os parâmetros janela de tempo, diâmetro dos itens, tempo máximo e modificando o tamanho da área de carregamento, de acordo com os valores reais. No que diz respeito ao primeiro grupo, o TS apresentou um tempo menor que 10 segundos para resolver qualquer uma das instâncias e quando se compararam os valores de função objetivo geradas pelo algoritmo com aqueles praticados pela empresa, obteve-se uma melhoria média de 25,53%. Já para o segundo grupo, executaram-se instâncias com até 30 clientes, em um tempo menor que dois minutos para a maior instância.

Dominguez *et al.* (2014b) resolveram o 2L-HFVRP considerando a possibilidade de rotacionar os itens, o que até então não havia sido proposto da literatura, tratando as versões irrestritas do problema, ou seja, sem a restrição de sequenciamento de clientes. Para isso os autores utilizaram o mesmo algoritmo híbrido proposto em Dominguez *et al.* (2014a), o MS-BR, com a adição do algoritmo de perímetro de toque para resolver o aspecto de

carregamento. O MS-BR foi testado nas instâncias de Leung *et al.* (2013), que criaram um versão adaptada das *instâncias de referência* para frota heterogênea. Para o caso 2|UO|L, os resultados foram comparados com o SA_HLS de Leung *et al.* (2013). Já para a versão 2|UR|L, como não havia publicações prévias na literatura, compararam-se os resultados com aqueles obtidos pelo MS-BR orientado e pelo SA_HLS, a fim de estimar a redução de custos decorrente da rotação de itens. Observou-se que a versão 2|UR|L apresentou melhoria em relação aos resultados providos pelo SA_HLS, com uma redução média total de 4,17%. Ao comparar os cenários com e sem rotação resolvidos pelo MS-BR, notou-se que os cenários que permitiam a rotação dos itens viabilizaram redução nos custos totais.

O Quadro 2 sumariza, em ordem cronológica, a revisão da literatura, destacando as principais características do 2L-CVRP e suas variantes tratadas pelos pesquisadores, bem como a principal abordagem de resolução utilizada. No quadro, a característica "Formato dos Itens" é simbolizada pelas siglas *r*, que designa o formato retangular, e *c*, que indica forma circular.

Quadro 2- Resumo da revisão da literatura de 2L-CVRP

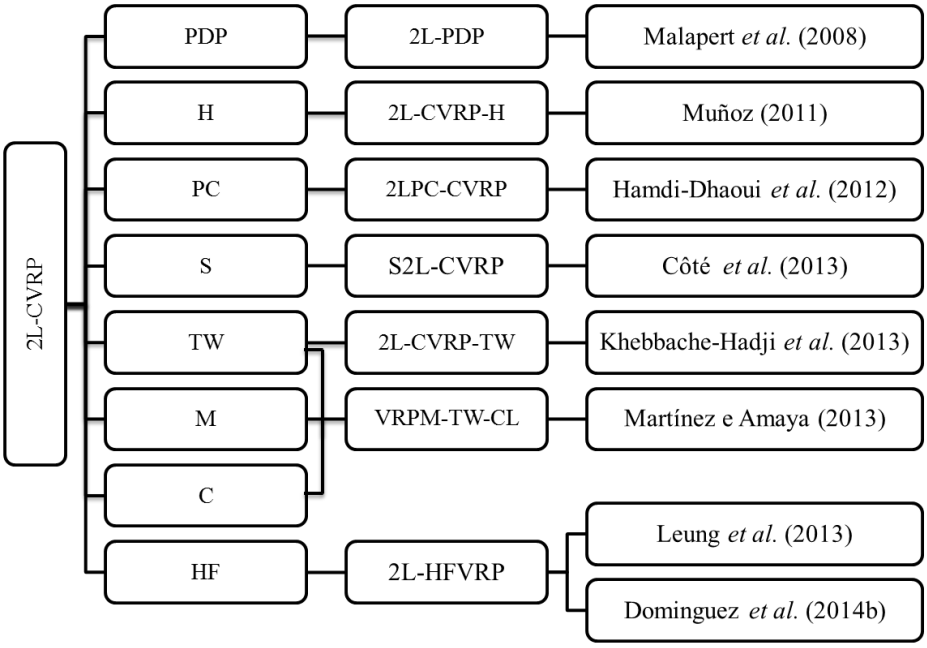
					Características																Abordagens de Solução
					Roteirização								2BPP								
Referência	**País**	**Nomenclatura do problema**	**Ano**	**Local da Publicação**	Capacidade	Frota Heterogênea	Janela de Tempo	Entrega	Coleta	Coleta e entrega	Múltiplas viagens	Estocasticidade na demanda	BPP	Ortogonalidade	Item orientado (Posição Fixa)	Item rotacionado (90º)	Carregamento Sequencial	Carregamento irrestrito	Otimização de manipulações	Balanceamento de carga	Formato dos Itens	**Principais Técnicas**
Iori *et al.*	Itália e Espanha	2L-CVRP	2007	Transport Sci	x			x					x	x	x		x				r	PLIM; B&C e B&B
Gendrau *et al.*	Canadá e Itália	2L-CVRP	2008	Networks	x			x					x	x	x		x	x			r	TS
Malapert *et al.*	Canadá e França	2L-PDP	2008	BPPC'08	x			x		**x**			x	x	x		x	x			r	BLF
Fuellerer *et al.*	Áustria e Itália	2L-CVRP	2009	COR	x			x					x	x	x	**x**	x	x			r	ACO
Zachariadis *et al.*	Grécia	2L-CVRP	2009	EJOR	x			x					x	x	x		x	x			r	GTS
Azevedo *et al.*	Brasil	2L-CVRP	2009	SBPO 2009	x			x					x	x	x		x	x			r	B&C
Strodl *et al.*	Áustria	2L-CVRP	2010	LNCS	x			x					x	x	x			x			r	VNS
Leung *et al.*	China	2L-CVRP	2010	FSM	x			x					x	x	x		x	x			r	SA
Muñoz	Chile	2L-CVRP-H	2011	PUC Chile	x			x					x	x	x	**x**	x	x	**x**		r	PIM; C&W e FC
Leung *et al.*	China	2L-CVRP	2011	COR	x			x					x	x	x		x	x			r	EGTS
Duhamel *et al.*	França	2L-CVRP	2011	COR	x			x					x	x	x			x			r	GRASP x ELS
Shen *et al.*	China	2L-CVRP	2012	IMECS 2012	x				**x**				x	x	x		x				r	GA
Hamdi-Dhaoui *et al.*	França	2LPC-CVRP	2012	MOSIM'12	x			x					x	x	x		x			**x**	r	NSGA-II
Zachariadis *et al.*	Grécia	2L-CVRP	2013	EJOR	x			x					x	x	x	**x**	x	x			r	PRMP
Leung *et al.*	China	2L-HFVRP	2013	EJOR	x	**x**		x					x	x	x		x	x			r	SA_HLS
Khebbache-Hadji *et al.*	França e Marrocos	2L-CVRPTW	2013	CEJOR	x		**x**	x					x	x	x			x			r	PNLM e MA
Côté *et al.*	Canadá	S2L-CVRP	2013	CIRRELT	x			x				**x**	x	x	x		x				r	PLIM e *L-shaped*
Bin *et al.*	China	2L-CVRP	2013	ICMSE 2013	x			x					x	x	x	**x**	x	x			r	ABC
Martínez e Amaya	Colômbia	VRPM-TW-CL	2013	JORS	x		**x**	x			**x**		x	x	x			x			**c**	PNLIM; TS e SI1SIH
Dominguez *et al.*	Espanha	2L-CVRP	2014	ITOR	x			x					x	x	x	**x**	x	x			r	PLI e MS-BR
Dominguez *et al.*	Espanha	2L-HFVRP	2014	ANOR	x	**x**		x					x	x	x	**x**		x			r	MS-BR
Abdal-Hammed *et al.*	França	2L-CVRP	2014	CoDIT	x			x					x	x	x			x			r	LNS
Wei *et al.*	China e Singapura	2L-CVRP	2015	EJOR	x			x					x	x	x		x	x			r	VNS

O Quadro 2 evidencia que entre os 23 artigos revisados, foram elaborados ao todo sete modelos matemáticos, que abrangem programação linear e não linear inteira mista, sendo um deles a versão tradicional introduzida por Iori *et al.* (2007) e os demais consistindo em variantes do 2L-CVRP. Em termos de abordagens exatas, Iori *et al.* (2007) e Azevedo *et al.*(2009) empregaram uma técnica similar (B&C) para resolver o problema, enquanto Muñoz (2011), Shen *et al.* (2012), Côté *et al.* (2013), Martínez e Amaya (2013) solucionaram instâncias de pequena escala de modo exato com o apoio de *softwares* como CPLEX, LINGO e X-PRESS. Nota-se que 87% dos autores utilizaram métodos heurísticos para construir uma solução para o 2L-CVRP. Isso se deve à necessidade alcançar soluções de instâncias de maiores escalas, que são mais condizentes com os problemas práticos. Apenas seis das 23 pesquisas analisadas incluem a rotação de 90º dos itens.

Com exceção do trabalho de Dominguez *et al.* (2014), que propõem uma abordagem integrada de resolução, em geral, os métodos de solução apresentados pelos demais autores se baseiam em uma metodologia similar: a componente de roteamento consiste no problema principal do algoritmo que constrói soluções e, iterativamente, chama algum algoritmo de empacotamento (subproblema), o qual verifica se a solução gerada é viável em termos de restrições de carregamento. A solução inicial, usualmente, é obtida via algoritmos construtivos, como, por exemplo, o clássico C&W, que foi utilizado em alguns dos artigos analisados. Após execução da parte construtiva, normalmente, incorporam-se algoritmos de melhoria, para otimizar as soluções inicias. É comum também utilizar estruturas de memória para armazenar as soluções factíveis, a fim de reduzir o tempo de execução dos algoritmos.

Além disso, observa-se que na literatura há poucas variantes do 2L-CVRP, sendo que os trabalhos desse gênero representam 34,8% do total analisado. Nesse universo, o artigo de Martínez e Amaya (2013) é o único que incorpora mais de uma variante (janela de tempo, múltiplas viagens e itens circulares). Os demais autores tratam de apenas uma variante, que neste caso são: janela de tempo, frota heterogênea, coleta e entrega, otimização de manipulações, equilíbrio de carga e estocasticidade da demanda, existindo apenas um artigo para cada uma dessas características, com exceção de frota heterogênea, para o qual há dois artigos, conforme Figura 7.

Figura 7 - Variantes do 2L-CVRP



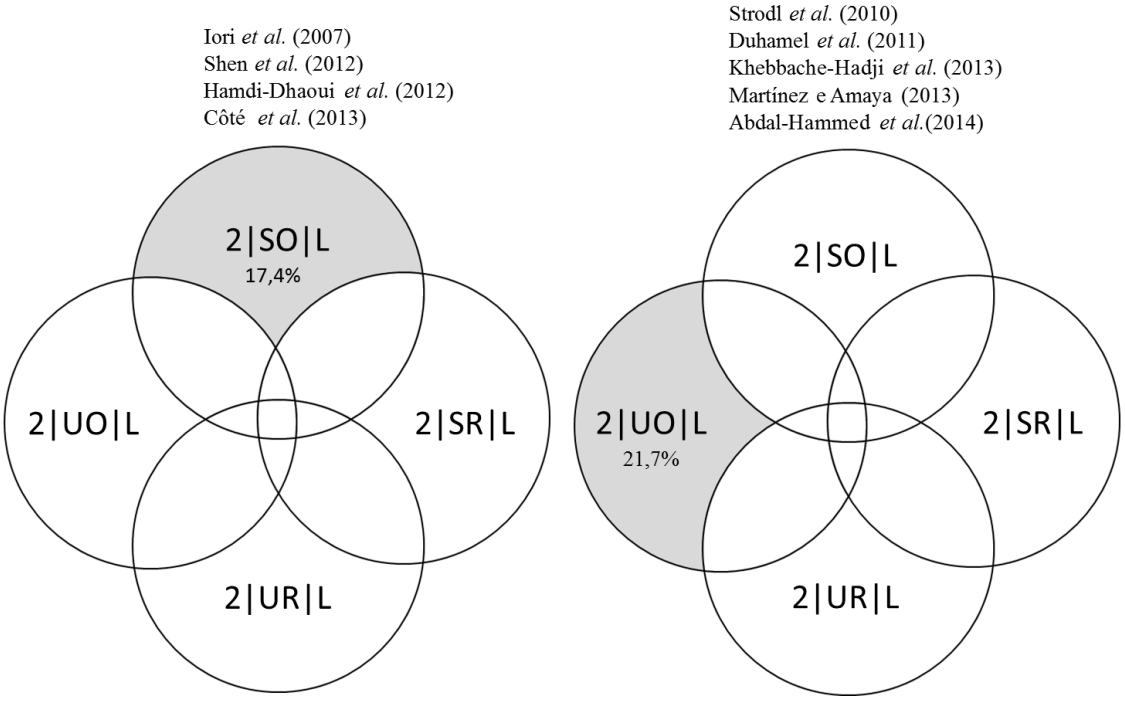
Legendas:
PDP: Pickup and Delivery Problem S: Stocastic M: Multitrips TW: Time Windows
C: Circular Item PC: Partial Conflict H: Handling Costs HF: Heterogeneos Fleet

É válido destacar que existe uma tendência de crescimento para pesquisas com enfoque em diversificações do problema, o que é ressaltado pelo fato de que cinco das oito publicações com variações foram publicadas a partir de 2013.

Percebe-se que até o ano de 2012 a média de publicação anual era de dois artigos. Em contrapartida, o ano de 2013 concentrou a maior quantidade de publicações em um ano, totalizando seis artigos.

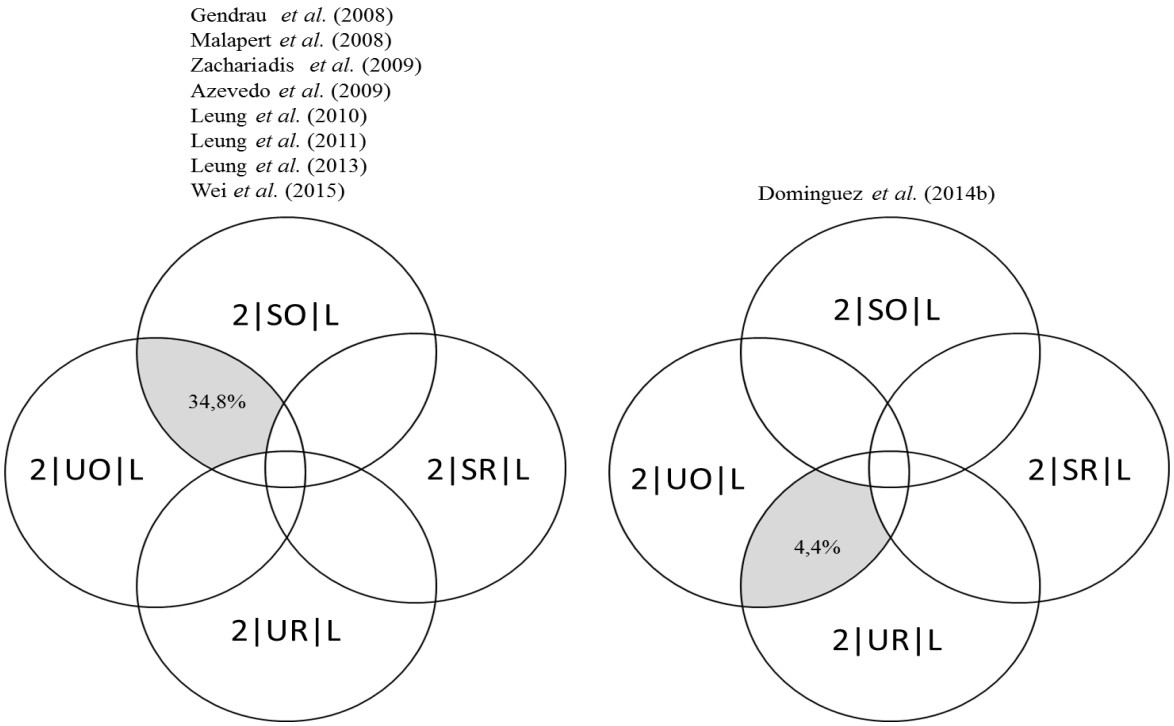
No que tange às categorias do 2L-CVRP, observou-se que 39,1% dos artigos exploraram apenas uma das categorias, sendo que 17,4% trata do 2|SO|L e 21,7% do 2|UO|L, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Distribuição de artigos que estudam apenas 1 categoria do 2L-CVRP



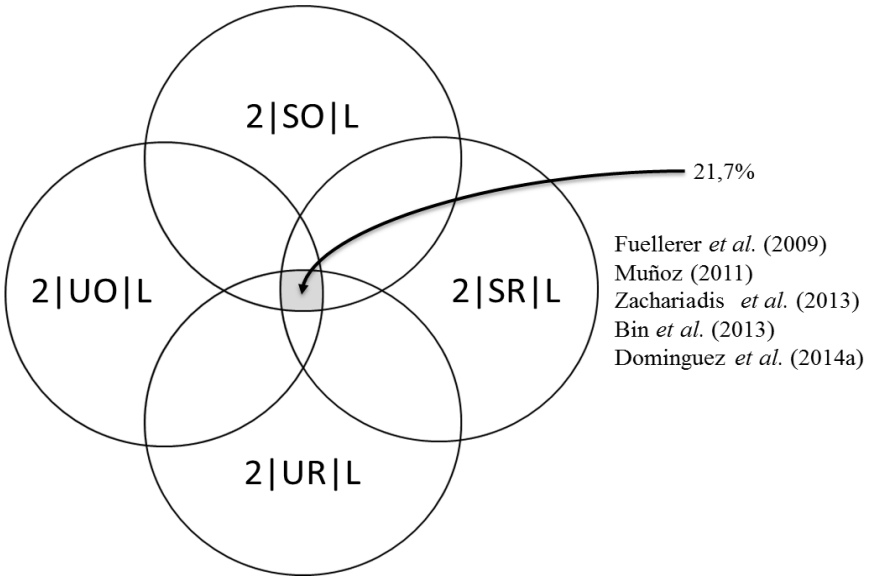
Quanto ao estudo de duas categorias simultaneamente, nota-se pela Figura 9 que a grande maioria dos artigos aborda as versões orientadas (2|SO|L e 2|UO|L), correspondendo à 34,8% do total, enquanto há apenas um artigo, que equivale a 4,4% do total, que engloba as duas classes irrestritas do problema (2|UO|L e 2|UR|L).

Figura 9 - Distribuição de artigos que estudam 2 categorias simultaneamente do 2L-CVRP



A Figura 10 mostra que os artigos que avaliam as quatro categorias do problema ao mesmo tempo correspondem a 21,7% do total. Entre estes, somente o de Muñoz (2011) estuda uma variante do 2L-CVRP.

Figura 10 - Distribuição de artigos que estudam 4 categorias do 2L-CVRP



O Quadro 3 apresenta as características do ambiente de desenvolvimento e de teste empregadas em cada artigo para resolução dos modelos e das meta-heurísticas propostos.

Quadro 3 - Resumo de Propriedades Operacionais dos Experimentos Computacionais

	Características Operacionais			
Referência	**Linguagem de Programação**	**Sistema Operacional**	**Características do Computador**	**Software de apoio para resolver MIP, MILP**
Iori *et al.*	C	?	Pentium IV, 3 GHz	CPLEX 9.0
Gendrau *et al.*	C	?	Pentium IV, 1.7 GHz	–
Malapert *et al.*	–	–	–	–
Fuellerer *et al.*	ANSI C++	Linux	Pentium IV, 3.2 GHz	–
Zachariadis *et al.*	Visual C++	Windows XP	Pentium IV, 2.4 GHz	–
Azevedo *et al.*	C	?	Intel Quad Core, 2.4 GHz	X-PRESS-OPTIMIZER
Strodl *et al.*	C++	Linux	Quad Core	–
Leung *et al.*	C++	Windows XP	Core Duo, 2.4GHz	–
Muñoz	C++	?	Intel Core™ i7, 2.67 GHz	CPLEX 12.0
Leung *et al.*	ANSI C++	Windows XP	Core 2 Duo, 2.0GHz	–
Duhamel *et al.*	C++	Linux	Opteron, 2.1GHz	CPLEX 11.0
Shen *et al.*	Java	Windows XP	Core™ 2 Duo, 2.53GHz	LINGO
Hamdi-Dhaoui *et al.*	C++	Windows 7	Pentium Dual Core, 2.2 GHz	–
Zachariadis *et al.*	Visual C++	?	Intel E6600, 2.4GHz	–
Leung *et al.*	C++	Windows 7	Core™ 2 Duo, 2.2 GHz	–
Khebbache-Hadji *et al.*	Delphi	Windows XP	Pentium IV, 3.6 GHz	–
Côté *et al.*	C++	Linux	Intel Xeon X5675, 3.07GHz	CPLEX 12.5
Bin *et al.*	Visual C++	Windows 7	Core2 i5, 2.5 GHz	–
Martínez e Amaya	Visual Basic	?	Intel Xeon, 1.86GHz	X-PRESS IVE
Dominguez *et al.*	Java	Windows 7	Intel Core™ 2 Duo, 2.4 GHz	–
Dominguez *et al.*	Java	Windows 7	Intel Core™ i7, 2.2 GHz	–
Abdal-Hammed *et al.*	C++	?	Pentium Core i5-2500, 3.3 GHz	–
Wei *et al.*	C++	Linux	Intel Xeon E5430, 2.66GHz	–

A partir do Quadro 3 nota-se que a linguagem de programação mais utilizada foi o C++, correspondendo a 40,9% do total, e o solver mais usado foi o CPLEX, representando 57% entre os sete que usaram *software* de apoio. É importante considerar tais características ao efetuar comparações entre os resultados obtidos, pois elas impactam diretamente o desempenho computacional.

Em suma, pode-se afirmar que há uma constante busca por novos métodos de resolução, que garantam um tempo de execução mais rápido e uma solução mais próxima da otimalidade. E também existe uma maior propensão para tornar o problema mais realista e conforme com as necessidades práticas por meio da incorporação de variantes ao modelo original.

Apesar dos avanços percebidos nas pesquisas de 2013 e 2014, ainda há muitas lacunas a serem preenchidas nesta área, como:

- Explorar problemas com aplicação real (estudos de caso);
- Solucionar o problema com Coleta e Entrega, pois o mesmo foi proposto, porém não resolvido;
- Fazer mais combinações entre as variantes do problema de VRP, como por exemplo, incorporar frota heterogênea com coleta e entrega, janelas de tempo e estocasticidade da demanda ao mesmo tempo;
- Criar mais modelos matemáticos que representem a incorporação das variantes;
- Explorar abordagens de resolução exatas que consigam solucionar instâncias de grande escala;
- Todos os problemas se baseiam no modo de transporte rodoviário, via caminhão. É necessário explorar casos com aplicações em outros modos, como aquaviário, com ênfase no transporte por navios, e o modo aéreo;
- Adicionar restrições de carregamento específicas (questões relativas ao centro de gravidade do carregamento a fim de equilibrar as cargas);
- Explorar mais funções multiobjetivo que englobem as necessidades do mundo real.

2.5 LOGÍSTICA DE APOIO *OFFSHORE*

Nesta seção é descrita a logística de apoio *offshore*, a fim de garantir o entendimento do processo em estudo e dos termos que podem ser usados ao longo do trabalho.

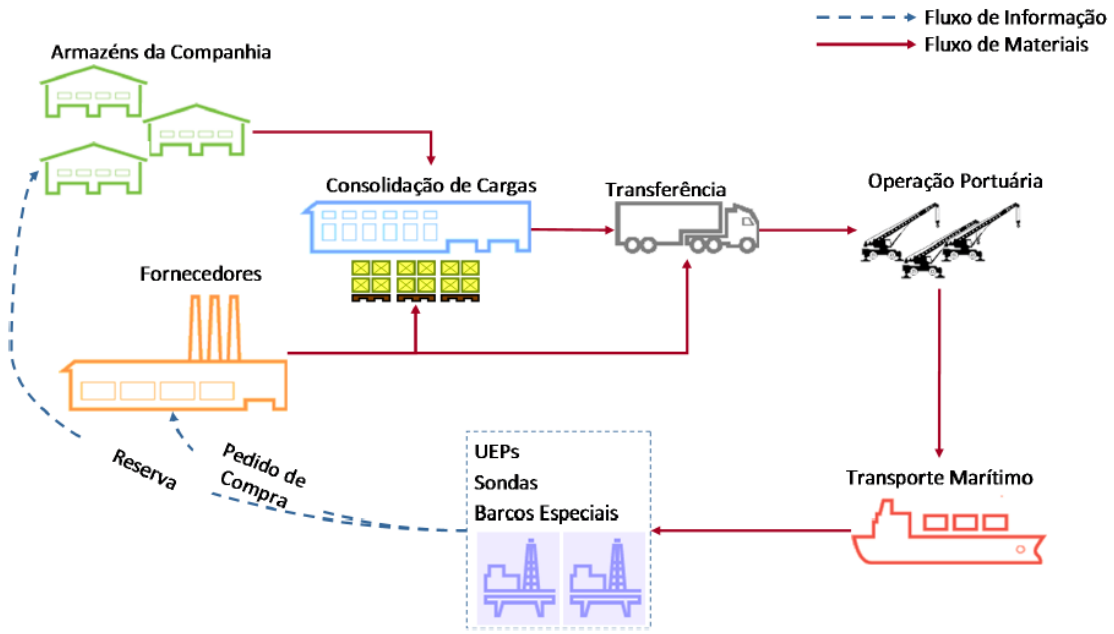
As operações de apoio *offshore* consistem nas atividades de transporte e armazenagem de cargas realizadas por embarcações de apoio para executar serviços de Exploração e Produção (E&P) nas plataformas *offshore* (AGUIAR, 2013).

Do ponto de vista logístico, tais operações abrangem a movimentação de cargas de pesos, formatos e tipos variados; e o planejamento de embarcações com diferentes especialidades, regras de atendimento e restrições operacionais. Acrescenta-se a isso os fatores estocásticos aos quais o sistema está submetido, tais como condições climáticas, riscos operacionais e ambientais nas plataformas *offshore* e outros (AGUIAR, 2013).

Dessa forma, define-se o sistema logístico de apoio *offshore* como um fluxo de materiais e informações que envolvem fornecedores nacionais e internacionais de suprimentos, armazéns e terminais portuários, visando atender as unidades marítimas com os insumos e

equipamentos necessários a sua continuidade operacional (LOPES, 2011; AGUIAR, 2013). A Figura 11 ilustra o exemplo da cadeia de suprimentos da Petrobras.

Figura 11- Representação esquemática do fluxo de materiais e informações na cadeia de suprimento *offshore* da Petrobras



Fonte: Lopes (2011)

Para exemplificar o funcionamento desta cadeia logística, será usado o caso da maior empresa de petróleo e gás do Brasil, a Petrobras.

Inicia-se a operação de atendimento a partir de um pedido da plataforma ao armazém, que pode ser da Petrobras ou de terceiros. A demanda é recebida pela área de armazenagem que irá fornecer as cargas e encaminhá-las para o porto por meio de carretas. Cada pedido no armazém se transforma em uma Requisição de Transporte (RT) (LOPES, 2011; AGUIAR, 2013).

Após a carga chegar ao terminal portuário, as RTs assumem o *status* "Liberado para Programação". A partir disso, os programadores de transporte marítimo podem alocar as cargas às embarcações disponíveis e determinar as rotas (LOPES, 2011; AGUIAR, 2013). Nesse processo de programação é necessário considerar alguns aspectos, tais como atributos das cargas demandas e prazos de entrega. Quanto ao primeiro ponto, as dimensões e peso das RTs restringirão a quantidade de cargas que poderão ser colocadas no convés ou nos tanques. No que tange aos prazos, cada RT tem uma data mais cedo e uma data mais tarde para entrega e, caso a entrega seja feita fora da janela de tempo, isso penalizará o Indicador de

Atendimento da Carga Marítima (IACM), que mede a quantidade de RTs atendidas dentro da janela em relação ao total de RTs atendidas (LOPES, 2011).

No terminal portuário, os principais recursos envolvidos no processo são a disponibilidade de berço e o espaço físico para recebimento das cargas. Depois que a embarcação atraca, descarrega-se o *backload*, ou seja, a carga que é recolhida na unidade marítima e levada ao porto, em seguida, carregam-se os suprimentos e posteriormente, a embarcação sai da base de apoio para atender as unidades marítimas (AGUIAR, 2013).

A fim de atender as plataformas *offshore* no prazo para garantir o funcionamento operacional das mesmas, as embarcações devem cumprir a programação de atendimento e a rota de navegação definidas (AGUIAR, 2013).

Com base nessa breve descrição do sistema logístico de apoio *offshore*, os elos mais significantes dessa cadeia de suprimentos, sendo eles os principais produtos transportados, as unidades marítimas, as embarcações de apoio marítimo e as bases de apoio serão abordados adiante.

- **Produtos Transportados**

Para a execução de operações *offshore*, diversos insumos são demandados pelas instalações *offshore* e transportados pelas embarcações de apoio marítimo, entre os quais se citam (LOPES, 2011):

a. *Carga Geral* – consiste em toda carga carregada no convés das embarcações. Classifica-se em quatro tipos principais: rancho, que constitui o alimento para a tripulação; tubos de perfuração e produção; produtos químicos; e carga geral comum, como contêineres. Ressalta-se que as operações realizadas no convés envolvem carga e descarga e são feitas por guindastes das plataformas ou das embarcações.
b. *Granéis Líquidos* – abrange as cargas cuja armazenagem é feita nos tanques no porão das embarcações. Os principais tipos transportados são: água potável, usada para consumo e higiene da tripulação da plataforma a ser suprida; óleo diesel, usado como combustível para motores e equipamentos elétricos das plataformas; fluido ou lama de perfuração, utilizada no interior do tubo de perfuração para lubrificar o sistema; e salmoura.
c. *Granéis Sólidos* – também são armazenados nos tanques e silos das embarcações. Cimento, baritina e bentonita configuram-se como os principais tipos de granéis sólidos transportados.

Também há cargas que retornam das plataformas, denominadas *backload*, realizando o fluxo inverso, ou seja, saem das plataformas para o porto. Em geral, o *backload*, que pode ser composto, por exemplo, de lixo, contêineres vazios e tubos usados, é levado em cestas de resíduos. Além disso, existem ainda as cargas de *transbordo*, as quais são coletadas em uma unidade marítima e transportadas a outra.

- **Unidades Marítimas**

As Unidades Marítimas (UM's), as quais emitem os pedidos de suprimentos, podem ser categorizadas em: plataformas de perfuração ou sondas; plataformas de produção; e embarcações especiais (ALMEIDA, 2009; LOPES, 2011). As UM's estão envolvidas com as atividades de prospecção e produção, e precisam de vários tipos de suprimentos: água potável, óleo diesel, alimentos, cimento, lama, tubos de perfuração, tubos de produção, e outros equipamentos e insumos. Cada um desses tipos difere quanto à necessidade de cargas, urgência e incerteza na demanda.

As plataformas de perfuração ou sondas perfuram os poços produtores e exploratórios de petróleo. Insumos como fluidos de perfuração, baritina, bentonita se configuram entre os principais tipos de carga demandada, já que são necessários à realização das atividades de perfuração. Tal plataforma, que possui capacidade de armazenagem pequena, está sempre em movimento a fim de explorar áreas pouco conhecidas. Uma característica típica de sua demanda é a incerteza, e por isso, as plataformas de perfuração efetuam um número grande de pedidos de emergência. Também se destaca o fato de esta consistir na unidade marítima mais cara entre todas, o que faz com que qualquer atraso na entrega de um insumo essencial impacta significativamente nos custos (LOPES, 2011).

As plataformas de produção são posicionadas nos campos já descobertos e atuam na extração do petróleo e gás natural. Tais plataformas, que tendem a ter uma localização fixa ao longo de sua vida útil no campo de petróleo, caracterizam-se por possuir um padrão de demanda mais previsível, com um maior consumo de rancho e produtos químicos (LOPES, 2011).

As embarcações especiais, ou barcos de apoio, executam serviços auxiliares para a instalação e manutenção dos sistemas *offshore*. Essas embarcações, que sempre estão em movimento, vêm à base ocasionalmente e são supridas pelas embarcações de apoio marítimo (LOPES, 2011). Citam-se alguns exemplos de barcos de apoio (ABEAM, 2010):

- *Research Supply Vessel* (RSV): Barco de apoio à pesquisa e coleta de dados sísmicos.
- *Diving Support Vessel* (DSV): Embarcações de suporte e apoio ao mergulho.

- *Pipe Laying Support Vessel* (PLSV): Embarcações usadas na construção e lançamento de linhas rígidas e flexíveis, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - PLSV

Fonte: ABEAM (2010)

- *Well Stimulation Vessel* (WSV): Embarcação usada para estimulação de poços, apresentada na Figura 13.

Figura 13 - WSV

Fonte: ABEAM (2010)

- **Embarcações de apoio marítimo**

As UM's são atendidas regularmente, pois, por restrições de espaço e de estabilidade, não é possível armazenar os suprimentos requeridos nas próprias UM's, sendo necessário o transporte periódico a partir de uma base de apoio continental. Não atender a uma demanda de uma unidade marítima pode ocasionar a interrupção do trabalho realizado a bordo, podendo levar a uma grande perda econômica (BREJON *et al.* , 1995).

O transporte dos insumos necessários é feito por Embarcações de Apoio Marítimo (EAM) com variadas características operacionais (tipo, área de convés, velocidade e capacidade de

carga). Em geral, o *Platform Supply Vessel* (PSV) é o mais utilizado para fazer o transporte marítimo até as plataformas. A Figura 14 ilustra um exemplo desse tipo de embarcação.

As embarcações do tipo PSV são especializadas no apoio às plataformas de perfuração ou produção e são usadas para atender as necessidades de suprimento das plataformas, navios-sonda e embarcações maiores. Sua principal função é transportar suprimentos para as plataformas e, normalmente, retornar com cargas para a costa. Estas embarcações transportam óleo combustível, água potável, produtos químicos, água industrial, tubulações e ferramentas especiais, granéis, rancho, cimento, etc (ABEAM, 2010).

Os PSV's são usualmente categorizados segundo o porte bruto, medido em Toneladas de Porte Bruto (TPB), que pode variar de 1000 TPB até 4500 TPB. Os tipos mais comuns são PSV 1000, PSV 3000 e PSV 4500. O porte de um navio está diretamente relacionado com sua capacidade de armazenagem, tamanho da área de convés e quantidade de tanques, além de impactar no consumo de combustível (LOPES, 2011).

Figura 14- PSV

Fonte: ABEAM (2010)

Além dos PSV's, podem ser usados outros tipos de embarcações como o *Utility Boat* (UT), que se trata de um supridor de pequeno porte, que, por ser mais veloz que o PSV, é usado para efetuar entrega de cargas rápidas (Figura 15). Essa embarcação caracteriza-se pela alta velocidade e por possuir menor resistência do piso, o que impossibilita o transporte de cargas

pesadas, como tubos. Visa abastecer as UM's com carga geral de pequeno porte que sejam urgentes e afetem a operação das UM's (ABEAM, 2010; LOPES, 2011).

Figura 15 - UT

Fonte: ABEAM (2010)

Sabe-se que há outros tipos de embarcações que apoiam a logística *offshore* desempenhando outras funções que não se restringem ao abastecimento, como *Anchor Handling and Tug Supply* (AHTS), que é usado principalmente para rebocar e posicionar plataformas, mas também pode ser utilizado no transporte de suprimentos; *Crewboat* (CB), que transporta tripulantes para as plataformas para efetuar trocas de turmas; *Oil Spill Response Vessel* (OSRV), que é usado no combate ao derramamento de óleo; entre outras (ABEAM, 2010).

- **Bases de Apoio**

A base de apoio é o porto no qual se realizam as operações carregamento de suprimento nas embarcações para atender às unidades marítimas e as operações de descarregamento do *backload* (LOPES, 2011).

Enquanto não são programadas, as embarcações ficam fundeadas. Quando são programadas, elas aguardam vaga em um dos berços do terminal para executar as operações de carga e descarga (LOPES, 2011).

2.5.1 Abordagens para o problema de roteamento e programação de navios de suprimento de plataformas offshore

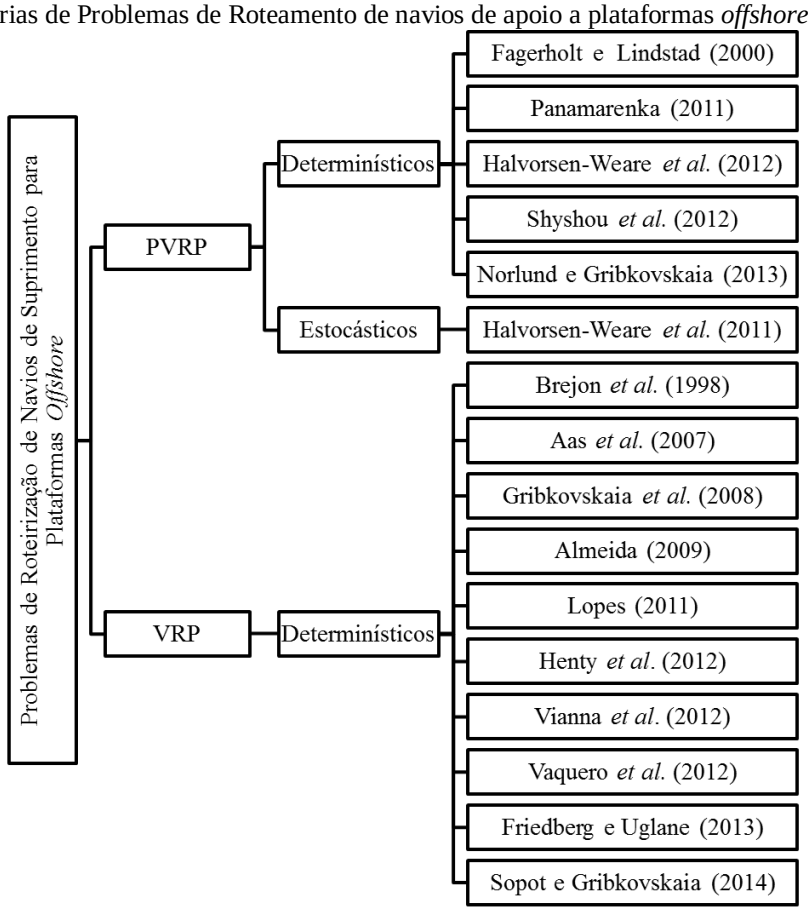
Na logística *offshore*, o planejamento eficiente das operações de navios de suprimentos é muito importante, pois afetam as atividades em curso em unidades marítimas. Além disso, a decisão sobre o tamanho da frota e sua utilização tem um forte impacto econômico, uma vez que estes navios constituem um recurso bastante caro (MAIUSIK e GRIBKOVSKAIA, 2014).

Os navios de suprimento abastecem periodicamente as instalações *offshore* com cargas a partir de bases de apoio *onshore* segundo uma programação de navegação semanal. Normalmente, predefine-se o conjunto de plataformas a ser atendido a partir de um porto. Uma programação de navegação semanal define uma frota de navios e um conjunto de viagens para cada navio a partir da base *onshore* durante a semana. Cada viagem representa uma rota com duração de alguns dias, com um determinado dia de início e uma sequência de plataformas para visitar (MAIUSIK e GRIBKOVSKAIA, 2014).

Transportar cargas para unidades *offshore* representa um problema de distribuição física que abrange coleta e entrega, frota heterogênea, múltiplas cargas, estocasticidade, a priorização de algumas cargas, múltiplas viagens, condições climáticas, e restrições como os limites de área do convés de carga e o número de berços no porto. Em geral, o problema inclui apenas uma base de apoio (o porto). Uma solução ótima garante um serviço de alto nível, usualmente associado aos atrasos ou pedidos não entregues, a um custo mínimo. Todos esses atributos tornam o problema de roteamento de navios de suprimento um desafio (LEITE, 2012).

No que se refere às abordagens para a roteamento de navios de suprimento para plataformas *offshore*, há duas categorias (LEITE, 2012): a que soluciona o problema como um *Periodic Vehicle Routing Problem* (PVRP), visando criar programações periódicas para os navios; e a que propõe soluções para o VRP, para designar algoritmos para roteirizar os navios considerando a carga disponível para transporte, ou seja, algoritmos operacionais para a execução diária. Ou seja, a principal característica que difere as categorias reside no fato de o problema de roteamento incluir ou não a questão da periodicidade. A representação esquemática das categorias com os respectivos artigos é mostrada na Figura 16.

Figura 16 - Categorias de Problemas de Roteamento de navios de apoio a plataformas *offshore*



Considerando os modelos periódicos determinísticos, o problema de planejamento de navio de suprimento consistindo na determinação da composição da frota e horários semanais dos navios é estudado em Fagerholt e Lindstad (2000), Panamarenka (2011), Halvorsen-Weare *et al.* (2012), Shyshou *et al.* (2012) e Norlund e Gribkovskaia (2013). Especificamente Panamarenka (2011) e Norlund e Gribkovskaia (2013) tratam de aspectos ambientais relativos à redução de emissão de combustível.

Fagerholt e Lindstad (2000) estudaram um problema real da Statoil, que é uma das maiores companhias de petróleo e gás que opera no Mar do Norte e no Mar da Noruega. O objetivo era determinar a política ótima de programação de navios de suprimento que atendem sete instalações *offshore* no Mar da Noruega a partir de um depósito *onshore* considerando o efeito do fechamento de operações nas instalações durante os períodos noturnos. Os autores trataram o problema como um *Multitrip Vehicle Routing Problem* (MVRP), pois na situação analisada, um navio pode realizar muitas rotas ou viagens durante o horizonte de tempo considerado, que nesse caso foi uma semana. Para definir a frota ótima e a programação semanal, foi proposto um algoritmo desenvolvido em duas etapas. Na primeira, um número viável de

programações candidatas é gerado para cada navio, resolvendo-se um TSP via programação dinâmica simples para determinar a sequencia de visita, além de definir a duração da programação. Na segunda etapa, os navios a serem usados e sua programação semanal são determinados pela solução de um modelo de programação inteira, cuja função objetivo é minimizar os custos. Os autores avaliaram a frequência das visitas às unidades *offshore* e adicionaram folga para aumentar a robustez da programação. Para efetuar os testes foram desenvolvidos seis cenários, variando o número de atendimentos semanais e o horário de funcionamento das instalações. No que se refere ao número de atendimentos semanais, os autores consideraram a possibilidade de cada instalação poder ser atendida três ou quatro vezes por semana. Quanto aos horários de funcionamento, consideraram-se três variações: na primeira as instalações 1 e 2 eram fechadas durante a noite, enquanto as outras operavam durante o dia todo; na segunda, todas as instalações eram fechadas durante a noite; e na terceira, todas as instalações operavam durante o dia todo. A solução recomendada envolve dois navios grandes navegando duas vezes por semana cada um, cada programação atendendo todas as instalações apenas uma vez. Essa opção representou uma redução de 43% dos custos totais do serviço em relação à forma como a empresa operava.

Panamarenka (2011) apresentaram a meta-heurística *Large Neighbourhood Search* (LNS) com otimização de velocidade para resolver o *Periodic Supply Vessel Planning Problem* (PSVPP) a fim de minimizar as emissões de combustíveis. O problema considera as seguintes restrições práticas: limite de duração das viagens, que pode ser dois ou três dias; limitação do número de instalações visitadas por cada navio por viagem; a capacidade de convés do navio; a demanda semanal de cada instalação; o requerimento de visita para cada instalação durante a semana; a capacidade e programação da base *onshore*. Em geral, as abordagens do PSVPP na literatura adotam velocidades fixas para as embarcações antes de efetuar o planejamento. Neste caso, a velocidade entre duas plataformas pode variar. O consumo de combustível, por sua vez, é fortemente dependente da velocidade, sendo que, neste trabalho, considera-se que a taxa de consumo de combustível é aproximadamente proporcional ao cubo da velocidade. A forma de calcular os custos de consumo de combustível totais é a principal contribuição do artigo. A LNS com otimização de velocidade abrange basicamente três etapas: remoção, reinserção e melhoria, sendo que o diferencial reside na fase de reinserção, na qual se implementou, simultaneamente, a rotina de otimização *intra-voyage*, que visa reduzir a duração de uma viagem, e o *Recursive Smoothing Algorithm* (RSA) cuja principal ideia é que a velocidade de custo mínimo para uma dada rota é a mesma para todos os trajetos de

navegação e determinada como uma fração da distância total navegada e subtração dos tempos de partida e chegada. A LNS foi codificada em C++ e implementada no Microsoft Visual C++ 2005. A base de dados, provida pela Statoil, possibilitou estruturar instâncias que variam de 3 a 14 plataformas. Todos os testes foram efetuados em um computador com processador Intel Pentium Dual-Core com 2,70Ghz e 2GB de RAM, usando o sistema operacional Windows 7. Percebeu-se que a redução da velocidade resulta em menores despesas de consumo de combustível e emissões de combustíveis. De modo geral, considerar a velocidade como variável de decisão permitiu reduzir os custos em virtude da diminuição dos custos de consumo de combustível total.

Halvorsen-Weare *et al*. (2012) estudaram o problema de planejamento de navios de suprimento, que consiste em determinar a composição da frota ótima de embarcações de apoio *offshore*, suas rotas semanais correspondentes e programações a partir de um depósito *onshore*. O artigo também se baseia no caso da empresa norueguesa Statoil, em que um depósito de suprimento *onshore* e as instalações *offshore* devem ter horário de abertura durante o qual se pode descarregar e carregar as embarcações de suprimento. O depósito é normalmente aberto para serviço durante o horário de trabalho regular norueguês (8h-16h). As plataformas geralmente são ou fechadas para operações durante a noite (19h-7h) ou mantidas abertas o tempo todo. O tempo médio de permanência dos navios no depósito é cerca de oito horas, que coincide com o horário de funcionamento. Um navio de suprimento precisará, portanto estar no depósito antes das 8h para começar uma nova viagem no mesmo dia. Assume-se que todas as viagens começarão a partir do depósito às 16h. Além disso, cada depósito tem uma capacidade limitada, que restringe o número de embarcações que podem ser preparadas para uma nova viagem em um determinado dia. A capacidade de convés de cada embarcação bem como as demandas semanais das plataformas são denotadas em termos de área (m^2). As instalações *offshore* precisam ser visitadas um determinado número de vezes durante a semana. Portanto, a demanda para cada visita é a demanda semanal dividida pelo número de visitas. Os autores apresentaram um método de solução baseado em viagem que possui duas fases. Na primeira fase, todas as viagens candidatas em que as embarcações de suprimento podem navegar são geradas a *priori*. Alguns dos *inputs* dessa fase são: matriz de distâncias, demandas, capacidade e velocidade dos navios e número mínimo e máximo de visitas por viagem. Inicialmente definem-se todos os subconjuntos de plataformas que podem ser visitadas por um navio e depois, para cada subconjunto, resolve-se o TSP com múltiplas janelas de tempo. Na segunda, a composição da frota e em quais viagens cada embarcação

pode navegar são decididas por meio da resolução de um modelo baseado em viagem cuja função objetivo é minimizar custos. Nesta fase, os *outputs* da primeira etapa, tais como custos de navegação, as instalações que serão visitadas, a sequencia e o tempo de visita e a duração da viagem em dias, são usados como *input*. Para efetuar os testes, foram geradas 22 instancias baseadas em dados reais, que englobam até 14 plataformas, sendo 11 fixas e 3 flutuantes, que são atendidas por um depósito. Para todas as instancias, cinco navios estão disponíveis com velocidade média de 12 nós. A duração de cada viagem pode ser dois ou três dias. A capacidade do depósito é de três navios por dia. Todos os resultados foram obtidos em um computador Intel Core 2 Duo com 2,16GHz e 2GB RAM. O gerador de viagens foi escrito em C++ usando Visual Studio 2005. O modelo baseado em viagem foi implementado e resolvido no X-press, com um tempo limite de 10000 segundos. A solução ótima foi encontrada para instâncias com até 12 plataformas. A Statoil implementou uma ferramenta de apoio à decisão fundamentada no modelo baseado em viagem, a qual tem se demonstrado essencial no processo de redução do número de navios de suprimento (de cinco para quatro), o que propiciou uma economia anual de custos em torno de US$ 3 milhões. O método proposto é suficiente para resolver os problemas de planejamento navio de suprimento da Statoil, mas não seria aplicável em instâncias de escala maior.

Shyshou *et al.* (2012) propuseram uma *Large Neighbourhood Search Heuristic* (LNS) para o problema de planejamento periódico de navio de suprimento (*Periodic Supply Vessel Planning Problem* – PSVPP) visando determinar a composição da frota e a programação do navio. Este problema se originou do problema real enfrentado pela Statoil para abastecer plataformas *offshore*. No PSVPP, uma frota heterogênea de navios que operam a partir de uma base *onshore* devem suprir instalações *offshore* periodicamente. O problema consiste em determinar a composição da frota e a programação dos os navios selecionados. Um cronograma de um único navio é definido como um conjunto de viagens de navios designados para os dias de um horizonte de planejamento. Define-se uma viagem de um navio como uma sequência de plataformas a visitar, começando e terminando na base *onshore*. Na prática, o horizonte de planejamento é usualmente uma semana. Cada plataforma deve ser visitada um dado número de vezes durante a semana e sua demanda deve ser distribuída uniformemente entre as visitas. Para garantir um fornecimento estável a partir da base, as saídas de carga da base para cada instalação devem ser distribuídas ao longo da semana. Há outras limitações práticas, como o horário de funcionamento das instalações *offshore* e da base *onshore*, as capacidades da base e dos navios, os dias disponíveis para cada navio, limites inferiores e

superiores sobre a duração da viagem e sobre o número de paradas por viagem. Algumas das instalações *offshore* estão fechadas para as operações de carga e descarga durante a noite, o que introduz janelas de tempo. Cada viagem deve durar dois ou três dias. A função objetivo consiste na minimização da soma dos custos de afretamento de embarcação e dos custos da navegação e serviço. A meta-heurística foi testada no conjunto de 22 instâncias utilizadas por Halvorsen-Weare e*t al.* (2012) com base em dados reais fornecidos pela Statoil. Essas instâncias variam em tamanho, com a menor contendo três plataformas e a maior envolvendo 14 plataformas. Compararam-se os resultados com aqueles obtidos com a *Voyage Based Formulation* (VBF) de Halvorsen-Weare *et al.* (2012) implementado no X-press. A LNS produziu soluções ótimas ou quase ótimas para as instâncias com até 12 instalações. Em instâncias de tamanho pequeno e médio, a VBF é um pouco melhor e muito mais rápida que a LNS. No entanto, à medida que o tamanho da instância aumenta, a VBF torna-se menos eficaz devido à rápida expansão de tempo de processamento. Em comparação, o tempo de processamento da LNS é mais estável e essa heurística começa a superar a VBF nos casos mais difíceis que envolvem 14 instalações. Para mostrar que a LNS pode ser aplicada a uma situação real, também foram criadas instâncias maiores que abrangem de 26 a 31 plataformas combinando algumas instâncias menores, pois não se teve acesso a instâncias maiores e reais da Statoil. Para solucionar essas instâncias maiores, o tempo de processamento variou de três a seis horas.

Norlund e Gribkovskaia (2013) estudaram uma forma de otimizar a velocidade de navios de suprimento *offshore* a fim de reduzir a emissão de combustíveis. As autoras incorporaram a otimização de velocidade no algoritmo de planejamento navio de suprimento de Halvorsen-Weare *et al.* (2012) utilizado pela Statoil. Tal algoritmo é constituído de duas fases: a geração de viagens, que produz todas as viagens mais curtas viáveis para cada navio e um conjunto de plataformas; e o modelo de cobertura de conjuntos baseado em viagem, que define quais navios e viagens serão usados na programação semanal, determinando os dias de início das viagens. O objetivo é minimizar a soma dos custos de fretamento do navio e os custos de combustível da viagem, diretamente proporcional ao consumo. A ideia das estratégias de otimização de velocidade se baseia na programação do tempo de espera inter-viagens e intra-viagens durante a geração de viagem e a construção de uma programação semanal, a fim de reduzir e velocidade e, por conseguinte, o consumo de combustível. Quatro estratégias de otimização de velocidade foram desenvolvidas para construir viagens com velocidade otimizada e aplicadas a *priori* e a *posteriori* no algoritmo de Halvorsen-Weare *et al.* (2012).

Os algoritmos de otimização de velocidade foram implementados usando o Visual Studio 2008 no gerador de viagem escrito em C ++. O modelo de otimização foi resolvido no Xpress. Para efetuar os testes, foram criadas 16 instâncias baseadas em dados reais da Statoil. As pequenas instâncias abrangem cinco instalações e nove visitas por semana; as instâncias médias têm sete instalações e 15 visitas; e as grandes instâncias envolvem 10 instalações e 25 visitas. Para todas as instâncias considerou-se a disponibilidade de três navios idênticos com velocidade de 12 nós e os mesmos dados referentes a capacidade, consumo de combustível e custos; velocidades mínima e máxima foram de 10 nós e 14 nós, respectivamente; e a duração das viagens era limitada a 2 ou 3 dias. Todos os testes foram executados em um computador Intel Core 2 Duo com 2,19 GHz e 1,99 GB. Os testes realizados mostraram uma economia de até 25% no consumo de combustível sem aumentar o tamanho da frota. Nas operações atuais, a Statoil aplica a estratégia de redução de velocidade nos trajetos com o tempo de espera *a posteriori*. Obteve-se uma média de 10% na redução de consumo de combustível, o que representa uma redução anual de 900 toneladas de emissões de CO_2 para um único navio.

O planejamento de programações de embarcações de suprimento, robusto às incertezas das condições climáticas, sendo, portanto, um problema estocástico, foi estudado por Halvorsen-Weare e Fagerholt (2011). Robustez, neste trabalho, refere-se à capacidade de uma viagem ou programação permitir acontecimentos não previstos durante a sua execução. Tal estudo foi realizado na empresa norueguesa Statoil, na qual Halvorsen-Weare *et al.* (2012)[5] vinham implementando o modelo baseado em viagem, o qual não considera a robustez, mas encontra a programação ótima baseada na velocidade dos navios e nos tempos de atendimento às instalações *offshore*. Ao longo da implementação na empresa, notou-se o impacto das condições meteorológicas sobre a execução de um cronograma, e, por isso, surgiu a necessidade de se incorporar robustez ao problema. Consideraram-se as seguintes características do problema: janelas de tempo, frota heterogênea, a existência de um tempo pré-determinado para abertura do porto, e instabilidade climática presente no ambiente, que é o fator de incerteza mais crítico do problema de planejamento de navios de suprimento e pode afetar a velocidade de navegação e o tempo de atendimento a plataformas, resultando em atrasos. Os autores analisaram diferentes abordagens para criar programações robustas, tais como exigir um número de horas de folga para cada viagem navegada, beneficiar programações onde os navios não navegam mais de duas viagens durante a semana e punir viagens com base na média da demanda não entregue calculada a partir da simulação das

[5] Este artigo foi publicado em 2012, mas submetido por Halvorsen-Weare *et al.* em 2010. Por isso o artigo de 2011, que inclui o mesmo grupo de autores, o cita.

viagens dadas certas condições climáticas probabilísticas. A partir do modelo de Halvorsen-Weare *et al.* (2012), desenvolveu-se um método de solução que combina otimização e simulação. O método geral da solução consiste em três passos: 1) Gerar todas as viagens candidatas que os navios poderão navegar; 2) Simular cada viagem candidata e atribuir uma medida de robustez; 3) Resolver o modelo baseado em viagem com medidas de robustez atribuídas a cada viagem. As etapas 1 e 3 são análogas às fases 1 e 2 de Halvorsen-Weare *et al.* (2012). Adicionaram-se os seguintes dados de entrada, os quais foram usados no passo 2 para calcular uma medida de robustez para cada viagem candidata: dados estatísticos sobre os elementos incertos do problema, neste contexto, dados meteorológicos. A medida de robustez usada é a demanda não entregue, a qual é incorporada à função objetivo do modelo original, sendo multiplicada pelo custo de penalidade para cada m^2 não entregue. O modelo de programação robusta proposto visa determinar a frota ótima, a programação e as rotas a fim de minimizar o custo. Para testar as abordagens de robustez foram criadas 18 instâncias com base em dados reais fornecidos pela Statoil, e que podem conter 5, 7, 10 ou 13 plataformas *offshore* e variam a quantidade de plataformas com restrição de janela de tempo. O número de visitas para cada plataforma *offshore* pode variar de uma a seis, e as demandas semanais variam de $250m^2$ a $960m^2$. Essas demandas são divididas pelo número de visitas semanais para obter a demanda de cada visita. Os tempos de atendimento nas plataformas *offshore* variam de 2,25h a 7h. Há cinco embarcações de apoio disponíveis cujas capacidades de carga variam 900 m^2 a 1090 m^2. As velocidades de todos os navios são 12 nós. O depósito tem capacidade para atender três navios diariamente, exceto aos domingos, quando ele é fechado. A duração de cada viagem é de dois ou três dias, e de segunda a quinta-feira apenas duas viagens por dia podem ser iniciadas, e nas sextas-feiras e sábados, permite-se três viagens por dia. Utilizou-se um computador Intel Core 2 Duo com 2.16 GHz e 2 GB para executar os testes. O modelo baseado viagem foi implementado em Xpress-IVE 1.19.00 com Xpress-Mosel 2.4.0 e resolvido pelo Xpress-Optimizer 19.00.00. Definiu-se um limite de tempo de 3600 segundos para resolução do modelo. O gerador de viagem e o modelo de simulação de viagem e programação foram escritos em C ++ usando o Visual Studio 2005. Os resultados computacionais obtidos mostraram que a adição de alguns critérios de robustez ao processo de otimização da criação de uma programação para o problema de planejamento navio de suprimento retorna um custo menor do que se tais critérios não fossem considerados. O efeito é maior à medida que aumenta o número de plataformas e a quantidade de janelas de tempo.

No que tange aos modelos não periódicos, Brejon *et al.*(1998) resolveram o Problema de Transporte de Suprimentos para unidades marítimas em termos de programação do transportes (PTS-P). Os autores trataram o problema como um Problema de Roteamento e Programação de Veículos com Restrição de Janela de Tempo (PRPVRJT) e criaram o algoritmo APTSP, que foi adaptado da heurística de inserção I1 de Solomon (1987). O objetivo principal não era dimensionar a frota, mas sim criar um método que pudesse ser usado como sistema de simulação a fim de testar hipóteses de perfil de frota e analisar a que apresenta melhor desempenho. O problema inclui muitas restrições reais inerentes ao problema, tais como: uso de frota heterogênea; data inicial de disponibilização de embarcação e períodos de indisponibilidade, para atividades de manutenção, por exemplo; e tempo limite e janelas de tempo para cada unidade marítima (UM); diferentes tipos de cargas de suprimento (água, diesel, tubos, carga geral, rancho). Testou-se o APTSP para resolução de um cenário em escala reduzida da Bacia de Campos, que incluía 5 UM's de atendimento a partir de 1 base (Macaé); uso de 4 embarcações; horizonte de planejamento de 30 dias e atendimento de 200 requisições e obtiveram-se resultados satisfatórios. Também se realizou um teste piloto para uma escala semirreal envolvendo 30 UM's, 8 embarcações e 900 requisições para um período de 30 dias. O tempo de processamento para este cenário foi de 2 horas e 10 minutos, contudo os resultados não foram apresentados pelos autores. O método considera a área e tonelagem de cargas para verificar a viabilidade de carregamento, mas não prevê a arrumação da carga no convés e não trata o equilíbrio náutico.

O problema de determinar rotas ótimas de navios de suprimento, considerando as capacidades limitadas das instalações *offshore*, é estudado em Aas *et al.* (2007) e Gribkovskaia *et al.* (2008).

Aas *et al.* (2007) consideraram um problema de roteamento real de navios de suprimento que atendem instalações *offshore* na Noruega e propuseram um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que contém restrições relativas aos requisitos de armazenamento. Essas restrições garantem a existência de capacidade suficiente no convés da plataforma e a possibilidade de realizar tanto serviços de coleta quanto de entrega. Dessa forma, o artigo visou analisar a forma como a capacidade limitada de armazenamento da instalação *offshore* afeta a roteamento dos navios de suprimento. Foi o primeiro artigo da literatura de roteamento de veículos a abordar o problema sob a perspectiva de limitações da capacidade da plataforma nas instalações *offshore*. Formulou-se o PLIM, cuja função objetivo é minimizar os custos, como uma extensão do *Single Vessel Routing Problem with Pickups and Deliveries*

(SVRPPD), introduzido por Gribkovskaia *et al.* (2007), incluindo restrições de capacidade de clientes. No SVRPPD, permite-se que cada cliente seja visitado uma vez ou duas vezes. No primeiro caso, tanto a coleta e a entrega são realizadas durante a mesma visita. No segundo caso, faz-se uma visita para a entrega e outra para a coleta. No entanto, nem a demanda de entrega, nem a demanda de coleta podem ser divididas entre duas visitas. Algumas simplificações foram adotadas, como, por exemplo, considerar apenas os contêineres como carga transportada; usar somente um único navio; desconsiderar limitações de peso nas plataformas; e mensurar demandas, capacidade do navio e espaço de armazenamento livre nas plataformas em termos de número de contêineres de tamanho médio; não inclui janelas de tempo e aspectos estocásticos. O modelo foi testado em instâncias com base em dados reais fornecidos pela empresa petrolífera norueguesa Statoil ASA. Os dois exemplos desenvolvidos, que continham no máximo quatro plataformas, foram resolvidos no CPLEX 9.0. Tal abordagem é incapaz de solucionar problemas de escala maior.

O problema de roteamento com coleta e entrega encontrado no atendimento à plataformas *offshore* de óleo e gás no Mar da Noruega foi estudado por Gribkovskaia *et al*. (2008). Para formular o modelo exato, os autores consideraram que o problema pertence à classe do *Single Vehicle Pickup and Delivery Problem with Capacitated Customers* (SVPDPCC), levando em conta a coleta de carga das plataformas e a capacidade limitada de armazenagem. O problema também é descrito como *One-to-Many-to-One* (1-M-1), porque todas as entregas se originam no depósito, e todas as coletas são enviadas para o depósito. O objetivo é encontrar a rota de menor custo do navio, que começa e termina na base *onshore*, visitando cada plataforma, de tal modo que sempre há capacidade suficiente no navio e na plataforma para realizar as operações de coleta e entrega. Para solucionar o 1-M-1 SVPDPCC os autores desenvolveram heurísticas de construção e propuseram um *Unified Tabu Search* (UTSA), que provou ser um dos mais bem sucedidos algoritmos TS para o VRP. Uma característica importante do método de busca UTSA é que as soluções não precisam satisfazer as restrições de capacidade e comprimento da rota. Em vez disso, a função objetivo é penalizada por violações. A heurística foi programada em Pelles C e executada em um computador com processador Intel Centrino 1,6GHz E 248 Mb e sistema operacional Windows XP. Foram geradas 119 instâncias de teste: quatro conjuntos de instâncias A, dois conjuntos de instâncias B, e um conjunto de instância C. Cada conjunto contém 17 instâncias de diferentes tamanhos. Todas as instâncias são derivadas das *instâncias de referência* do CVRP de Toth e Vigo (2002b). Foram selecionadas 17 instâncias que variam de 16 a 101 nós. As demandas de coleta e

entrega e a capacidade disponível nos nós foram geradas de diferentes maneiras, de acordo com cada grupo de instâncias. Neste artigo, portanto, não foram efetuados testes com base em dados reais, apesar de o problema ser aplicável à situação real de suprimento de plataformas *offshore*. As soluções produzidas pelo algoritmo podem ser Halmitonianas ou não, dependendo parcialmente dos vértices de demanda.

Entre os artigos relacionados a modelos não periódicos há também aqueles abordam estudos de caso na Petrobras (ALMEIDA *et al.*2009; LOPES, 2011; HENTY *et al*., 2012; VIANNA *et al*., 2012; VAQUERO *et al.* 2012; FRIEDBERG e UGLANE, 2013).

Almeida *et al.*(2009) propuseram um algoritmo genético, para programar embarcações de apoio *offshore* de um caso real com o objetivo de maximizar o nível de serviço, que neste caso representa o percentual de cargas entregues no prazo, e minimizar os custos envolvidos. O algoritmo tem duas etapas: na primeira nenhum carregamento pode ser atrasado, enquanto na segunda esta restrição é relaxada e alguns carregamentos podem ser atrasados de acordo com o nível de serviço requerido por cada unidade *offshore*. Foram consideradas as seguintes características do problema abordado: frota heterogênea; múltiplos depósitos; múltiplas viagens; limite de tempo na duração das rotas e janelas de tempo nas UM's; transporte de diferentes produtos (água, diesel, tubos, carga geral, rancho); priorização de entrega por tipo de produto; operações de coleta e entrega simultâneas e transbordo; disponibilidade do porto; direção da corrente marítima e condições climáticas. Esta otimização também não realiza a arrumação das cargas no convés e não busca o equilíbrio náutico. Avaliaram-se 31 cenários reais de demandas da Bacia de Campos, que abrangem até 64 plataformas, 755 cargas e 25 embarcações, e o algoritmo proposto conseguiu obter soluções ótimas ou quase ótimas em um tempo de processamento condizente com a realidade operacional.

Lopes (2011) resolveu o problema de roteamento de embarcações de apoio *offshore* da Petrobras, tratando-o como um *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (HVRP). O autor não considerou em seu escopo janela de tempo, multi-produtos e coleta e entrega. Para solucionar o problema, utilizou-se a meta-heurística *Record-to-Record Travel* (RTR) adaptada por Li (2005) e Li *et al.* (2007), denominada HRTR, para tratar o HVRP. O HRTR é determinístico e é desenvolvido em três fases. Na primeira, gera-se a solução inicial por meio da heurística de inserção de menor custo de Solomon (1987). Na segunda, efetua-se o laço principal, no qual se aplicam quatro métodos de busca local (Movimento de um ponto, Movimento de dois pontos, 2-Opt e Or-Opt) em duas etapas chamadas *Uphill*, que permite movimentos que piorem a solução atual, e *Downhill*, que só aceita movimentos que

aproximem a solução de um mínimo local. Na última fase, usa-se um algoritmo para perturbar deterministicamente a solução atual. Além disso, adaptou-se a biblioteca de Buscas Locais VRPH criada por Gröer *et al.* (2010) para resolver o CVRP, modificando-se o método de geração de solução inicial e os métodos de busca local, uma vez que é necessário considerar os diferentes atributos dos veículos. Utilizou-se instância de referência da literatura para efetuar testes e comparações com os melhores resultados conhecidos, conseguindo-se resultados bastante próximos, porém piores que os de Li *et al.* (2007) apesar de ter alcançando um tempo de execução significativamente menor e 10% melhores que os de Almeida (2009), que consiste no método empregado na Petrobras. Também, criou-se uma instância baseada em dados reais, considerando 65 plataformas, 218 pedidos e 21 navios de 4 tipos diferentes, e alcançou-se um resultado inferior ao obtido pela solução adotada na empresa. Para sanar tal dificuldade, adaptou-se o Operador de Concatenação presente na biblioteca VRPH e conseguiu-se melhorar ligeiramente a solução da Petrobras.

Henty *et al*. (2012) propuseram um modelo de Programação Linear Inteira Mista para programar e elaborar rotas para embarcações de apoio *offshore* com o objetivo de minimizar a distância percorrida. O modelo assume que a rota inicia a partir de uma embarcação com um estoque prévio de cargas e também admite entregas fracionadas, ou seja, uma UM pode ter sua demanda atendida por mais de um navio. No modelo, a capacidade das embarcações e as quantidades de cargas foram tratadas em termos volumétricos, já que foram usados nos testes dados reais de granéis sólidos e líquidos demandados pelas UM's da Petrobras. Para efetuar os testes, construíram-se três cenários: o primeiro com 13 UM's com suas respectivas demandas e 05 embarcações com seus estoques iniciais; o segundo com 12 UM's e 07 embarcações; e o terceiro com 11 UM's e 10 embarcações. O modelo de PLIM foi implementado no *software* de otimização LINGO 10.0. O tempo de execução para a maior instância foi de cerca de 9 minutos. Os resultados do modelo proposto foram comparados com os dos decisores da empresa e para um dos casos obteve-se uma redução de 80% na distância percorrida. Os autores verificaram que é quase impossível obter em tempo hábil soluções ótimas para instâncias maiores a partir da abordagem exata.

Vianna *et al*. (2012) propuseram três heurísticas baseadas nas meta-heurísticas GRASP, VNS e *Iterated Local Search* (ILS) para programar e elaborar rotas para embarcações de apoio *offshore*. As três heurísticas desenvolvidas, que utilizaram na etapa de busca local o método *Variable Neighborhood Descent* (VND), foram denominas de GRASP+VND, VNS+VND e ILS+VND. Tal problema foi tratado segundo o modelo de PLIM proposto por Henty *et al*.

(2012). Análogo a Henty *et al.* (2012), consideram-se os volumes de capacidades de embarcações e de quantidade de carga. Para efetuar testes, construíram-se três grupos de cenários distintos: pequeno porte, que contém até 13 UM's e 5 embarcações; médio porte, que apresenta até 28 UM's e 10 embarcações; e grande porte, que tem até 100 UM's e 15 embarcações. Para executar os cenários usou-se um processador Intel Core 2 Duo, de 4GB e sistema operacional Windows Vista e delimitou-se um tempo de parada de 60 segundos para as heurísticas propostas. Os resultados dos cenários de pequeno porte foram comparados com aqueles gerados pelo modelo PLIM e conseguiu-se obter, devido às características inerentes ao cenário, o ótimo global a partir das três heurísticas propostas. Os resultados dos cenários de médio porte foram analisados com relação ao roteiro gerado pelo decisor da empresa e conseguiu-se obter uma redução de até 45% na distância percorrida. Para os cenários de grande porte, avaliou-se o desempenho das heurísticas propostas em relação à melhor solução encontrada pelas três heurísticas e notou-se o melhor comportamento da heurística ILS+VND para problemas de maiores dimensões.

Vaquero *et al.* (2012) descreveram o processo de modelagem de planejamento e programação de operações de navios em plataformas de petróleo e portos usando uma abordagem *Artificial Intelligence Planning & Scheduling* (AI P&S), com foco no transporte e entrega de cargas, considerando uma série de restrições e elementos com base em um problema real da Petrobras. O modelo conceitual foi construído usando uma ferramenta *Knowledge Engineering* (KE), neste caso, a itSIMPLE, cuja modelagem segue uma abordagem orientada a objetos. Para modelar o problema usa-se a linguagem *Unified Modeling Language* (UML) e o ItSIMPLE, a partir dessa representação UML, traduz automaticamente o modelo para *Planning Domain Definition Language* (PDDL). O objetivo é minimizar a quantidade total de combustível consumido, o tamanho das filas de espera nos portos, o número de navios utilizados, o *makespan* da programação e o custo de ancoragem. Para validar o modelo a avaliar o desempenho de planejadores independentes de domínio disponíveis na literatura, os autores realizaram dois estudos de caso com base no seguinte cenário: consideraram-se duas faixas da costa brasileira, Rio de Janeiro e Santos, sendo que cada local tem um porto onde devem ocorrer as atividades de carregamento para suprir as plataformas *offshore*. Há seis plataformas na faixa do Rio de Janeiro e quatro na faixa de Santos. Existem seis navios disponíveis na base do Rio e quatro na base de Santos. As cargas são tratadas como contêineres. Em ambos os estudos de caso, analisou-se o desempenho dos planejadores selecionados para seis diferentes cenários de pedido de entrega, que apresentavam as

seguintes quantidades de carga, respectivamente: 5, 7, 9, 11, 13 e 15. Os experimentos foram efetuados em um computador Intel Core i7 3,07 GHz com 4 GB. No primeiro cenário, não são consideradas restrições de tempo, o objetivo é minimizar o consumo de combustível, o limite de execução é de 6 horas e foram selecionados três planejadores: Metric-FF (HOFFMANN, 2003), SGPlan6 (HSU e WAH, 2008) e MIPS-xxl 2008 (EDELKAMP e JABBAR, 2008). Neste caso, o Metric-FF sem otimização foi capaz de fornecer uma solução para todas as instâncias; o SGPlan6 não foi capaz de resolver problemas das instâncias com 9 e 15 cargas, pois o planejador parou antes de alcançar o limite de tempo; e o MIPS-xxl 2008 não resolveu nenhuma instância. No segundo cenário, incluem-se as restrições de tempo, que nesta situação referem-se aos tempos de processos como ancoragem, tempo de carga/descarga e não a um horário de atendimento de navios ou plataformas; a função objetivo consiste em minimizar o *makespan*; o tempo de processamento é de 3 horas e foram escolhidos três planejadores: POPF (COLES *et al.*, 2010), SGPlan6 e MIPS-XXL 2008. O SGPlan6 foi o único planejador que conseguiu resolver algumas instâncias. O POPF e o MIPS-XXL 2008 não resolveram qualquer uma das instâncias do problema. A partir dos resultados, os autores notaram que é possível solucionar o problema de suprimento de plataformas *offshore* por meio da abordagem AI P&S, contudo os planejadores independentes de domínio existentes ainda não provêm ferramentas necessárias para resolver o problema real.

Friedberg e Uglane (2013) apresentaram a estrutura e implementação de um modelo de otimização para o problema de roteamento e programação de *Platform Supply Vessels* (PSV), criando uma ferramenta de planejamento operacional para o caso da Petrobras, que supre plataformas *offshore* na Bacia de Campos a partir do porto de Macaé. Os autores estruturaram um modelo *arc-flow*, denominado *Platform Supply Vessel Routing and Scheduling Problem with Refueling Tankers* (PSVRSP-RT), que visa identificar as melhores rotas e horários para as partidas diárias de PSVs que atendem a um conjunto de instalações *offshore*. Tal modelo foi tratado como um *Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery, Soft Time Windows and Intermediate Refueling Tankers,* formulado como um problema de minimização de custos determinístico e resolvido como um Problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Para um horizonte de planejamento específico, o modelo visa alocar um conjunto de pedidos de coleta e entrega a uma frota de PSVs, que tem uma partida disponível por dia. Além de estabelecer o roteamento de PSVs e, assim, a sequência na qual os pedidos são atendidos, o modelo define o posicionamento ótimo de navios-tanque de reabastecimento na Bacia de Campos, o que até então não havia sido proposto na literatura de transporte marítimo. A

função objetivo minimiza os custos fixos e variáveis de navegação, além de minimizar os custos de penalização por atrasos e entrega expressa de pedidos. Considerando que uma ferramenta de apoio à decisão operacional agrega valor somente se é capaz de fornecer boas soluções dentro de um prazo aceitável, a fim de reduzir o tempo de processamento, os autores decompuseram o modelo *arc-flow* usando a abordagem *Dantzig-Wolfe Decomposition* (DWD), o que resultou em um modelo *path-flow*. No modelo decomposto, um subproblema (SP) foi resolvido para cada combinação de partidas e navios, enquanto um *Restricted Master Problem* (RMP) abrangia as restrições comuns e armazenava as colunas geradas nos subproblemas. A Geração de Colunas foi usada para resolver a relaxação linear do problema PLIM. Além disso, para fechar o *gap* do MILP e garantir uma solução inteira ótima, implementou-se um *Branch and Price* (B&P). Os dois modelos foram implementados no sistema Xpress-MP e testados em sete casos reais da Bacia de Campos, que variavam de 6 a 14 plataformas, de 6 a 10 navios do tipo PSV1500 e PSV300, e tinham tempo de execução máximo de 10 horas. Para acelerar o processo de solução do modelo *path-flow*, o processo *Break-First-then-Optimum* (BFO) mostrou-se a abordagem de geração de colunas mais eficiente. A comparação dos resultados dos modelos *arc-flow* e *path-flow* indicaram que o modelo *arc-flow* tem melhor desempenho para instâncias pequenas, mas, à medida que o tamanho do problema aumenta, o modelo *path-flow* torna-se superior. No entanto, ocorreu o efeito cauda longa (*tail-off)* no modelo *path-flow*, pois foi requerido um número elevado de iterações no B&P até a convergência dos dois limites. Um exemplo disso foi observado em uma das instâncias, na qual o *gap* após uma hora de execução era de 2,9% e após 10 horas, o *gap* caiu para 1,3%. Sob a ótica de planejamento prático, os *gaps* pequenos podem não impactar, contudo, o efeito cauda longa indica um dos pontos fracos da aplicação do B&P. Para avaliar o problema do ponto de vista econômico, focou-se em um caso da Bacia de Campos e utilizou-se o modelo *path-flow* para analisar como as alterações nos parâmetros de entrada influenciavam os custos totais ao longo do período de planejamento. Percebeu-se que a flexibilidade para abastecer os PSV a qualquer momento durante a realização da rota, bem como a redução e mudanças de posicionamento dos navios-tanque, não impactavam significativamente nos custos totais. No que diz respeito ao tamanho e composição da frota PSV, ficou claro que uma composição equilibrada é importante em termos de minimização do custo. Os resultados mostraram que um cenário que envolve capacidade em excesso, ou seja, uma maioria de embarcações PSV 3000, acarreta um aumento expressivo dos custos diretos. Em contrapartida, os casos que lidam com um déficit de capacidade mostraram um aumento nos custos indiretos associados aos custos de entregas atrasadas e expressas. No que tange à

sensibilidade do modelo quanto à alteração da penalidade de atraso, notou-se que os custos diretos, relacionados com a distância navegada e taxas fixas de aluguel de PSVs, foram pouco influenciados mesmo com alterações relativamente grandes nas penalidades.

Por fim, na categoria de modelos determinísticos não periódicos, a publicação mais recente é atribuída à Sopot e Gribkovskaia (2014), que trataram o problema de roteamento de veículo único com coleta e entrega com múltiplas cargas e serviços não simultâneos. Considerou-se o caso em que instalações *offshore* precisam ser supridas com vários tipos de cargas provenientes de uma base em terra, e também que algumas cargas necessitam ser transportadas das instalações de volta para a base. As operações de suprimento são realizadas por navios de abastecimento, que têm compartimentos separados para diferentes tipos de carga. O objetivo é encontrar a rota viável de menor custo satisfazendo as restrições de capacidade do navio para todos os tipos de carga. Os autores desenvolveram um modelo matemático para o problema e, para solucioná-lo, propuseram um algoritmo meta-heurístico baseado em *Tabu Search*, que lida com rotas não hamiltonianas onde os clientes podem ser visitados uma ou duas vezes. O algoritmo foi implementado em C usando Xcode. Todos os testes foram executados em um computador Max Intel i7 com 16Gb de RAM. Foram realizados experimentos em dois conjuntos de instâncias contendo dois tipos de carga. O primeiro grupo consistiu de instâncias aleatórias, que variavam de 7 a 11 nós, e foi elaborado a fim de se comparar com os resultados obtidos pela resolução via CPLEX do modelo. O objetivo do segundo experimento foi comparar o desempenho do algoritmo desenvolvido, em termos de acurácia, em instâncias de grande escala com a versão do *Unified Tabu Search* (UTSA) de Gribkovskaia et al. (2008), desenvolvido para o caso de carga única do problema de roteamento de veículo único com coleta e entrega e modificado para lidar com demandas de múltiplas cargas. As instâncias desse experimento foram geradas a partir das *instâncias de referência* do CVRP. O tamanho dessas instâncias varia de 15 a 100 nós. Esses testes mostraram que a meta-heurística proposta superou o CPLEX na velocidade de execução de instâncias de tamanho médio e foi capaz de gerar soluções para instâncias de grande porte com a mesma acurácia competitiva, mas mais rápido que o UTSA.

O Quadro 4 sumariza, segundo ordem cronológica, as principais características operacionais incorporadas ao problema, bem como as funções objetivo de cada estudo.

Constatou-se que todos os 16 artigos revisados especificamente para roteamento e programação de navios do tipo PSV de apoio a plataformas *offshore* foram originados a partir de pesquisas brasileiras (37,5%) ou norueguesas (62,5%), sendo que 43,75% se referiam ao

caso da Petrobras e 50,0% estudaram o caso da Statoil, que configuram duas das maiores empresas de exploração de petróleo e gás do mundo.

Além disso, pelo Quadro 4, nota-se que o principal objetivo dos problemas analisados é minimizar custos, apesar de terem sido encontradas algumas variações como a maximização de serviços. Ao todo, oito modelos de programação inteira foram propostos, sendo dois não lineares.

Percebeu-se que o trabalho de Almeida (2009) foi o que mais englobou características do problema real, conseguindo resolver instâncias de grande porte da Petrobras com 64 UMs, 755 cargas e 25 embarcações. Destaca-se que, este trabalho foi uma ferramenta desenvolvida internamente na Petrobras no grupo de Pesquisa Operacional e é usado pela empresa na Bacia de Campos para gerar as rotas para os PSVs (IACHAN, 2009; LOPES, 2011).

A grande maioria dos estudos desenvolvidos na Statoil tratou de instâncias pequenas, com até 14 plataformas. Ressalta-se a tendência do desenvolvimento de pesquisas com vieses ambientais, conforme observado em Panamarenka (2011), Vaquero *et al.* (2012) Norlund e Gribkovskaia (2013).

Evidencia-se, que nenhum dos artigos de logística *offshore* analisados abordou a arrumação de cargas utilizando o 2L-CVRP, sendo feitas considerações apenas a respeito de área ocupada e peso. Também, não foi encontrado nenhum artigo que tratasse o problema do equilíbrio náutico. Isso demonstra que esta dissertação estará contribuindo cientificamente com um campo ainda não explorado.

Quadro 4 - Resumo da Revisão da Literatura de Roteamento e Programação de PSVs

			Características Operacionais																						Função Objetivo						
Referência	**País**	**Ano**	Capacidade da embarcação	Capacidade do porto	Capacidade da plataforma	Frota Heterogênea	Janela de Tempo das UM's	Tempo Limite de duração da rota	Janela de tempo da embarcação	Janela de tempo para o porto	Entrega	Coleta	Coleta e entrega Simultânea	Transbordo	Múltiplas viagens	Multi-depósitos	Entregas Fracionadas	Diferentes tipos de carga	Priorização de tipo de carga	Compatibilidade entre naviose UM	Aspectos Probabilísticos	Velocidade variável	Aspecto ambiental	Posicionamento de navios-tanque	Minimizar custos	Minimizar distância total percorrida	Minimizar número de veículo	Minimizar tempo de navegação	Minimizar *Makespan*	Maximizar o nível de serviço	**Principais Técnicas**
Brejon *et al.*	Brasil	1998	x			x	x	x	x		x							x							x		x				APTSP
Fagerholt e Lindstad	Noruega	2000	x				x	x			x				x										x			x			PLI + DP
Aas *et al.*	Noruega	2007	x		x			x					x												x						PNLIM
Gribkovskaia *et al.*	Noruega	2008	x		x			x					x												x						PNLIM; UTSA
Almeida *et al.*	Brasil	2009	x			x	x	x					x	x	x	x		x	x	x	x				x					x	GA
Lopes	Brasil	2011	x			x					x														x						HRTR
Halvorsen-Weare e Fagerholt	Noruega	2011	x	x		x	x	x		x	x				x						x				x						Modelo de Programação Robusta; PLIM (VBF)
Panamarenka	Noruega	2011	x	x		x	x	x		x					x							x	x		x						LNS com velocidade otimizada
Henty *et al.*	Brasil	2012	x			x		x			x					x	x									x					PLIM
Vianna *et al.*	Brasil	2012	x			x		x			x					x	x									x					GRASP+VND, VNS+VND e ILS+VND
Halvorsen-Weare *et al.*	Noruega	2012	x	x		x	x	x		x	x				x										x						Algoritmo baseado em viagem; PLIM (VBF)
Shyshou *et al.*	Noruega	2012	x	x		x	x	x		x	x				x										x						LNS
Friedberg e Uglane	Noruega	2013	x			x	x	x					x		x									x	x						PLIM;DWD; B&P; BFO
Vaquero *et al.*	Brasil	2012	x								x					x							x		x				x		AI P&S: itSIMPLE
Norlund e Gribkovskaia	Noruega	2013	x	x		x	x	x		x	x				x							x	x		x						Algoritmo de Halvorsen-Weare *et al.* (2012)
Sopot e Gribkovskaia	Noruega	2014	x								x	x						x							x						PLIM; TS

2.5.2 Outros Estudos relacionados à logística *offshore* a montante

Como a literatura referente à roteamento de PSVs é recente e não é muito vasta, resolveu-se analisar outras tendências de pesquisa na logística *offshore* a montante.

Nesse sentido, encontrou-se uma pesquisa da área de roteamento e programação de embarcações de apoio às plataformas, contudo, relacionada à execução de tarefas de reboque e lançamento de linhas de ancoragem de plataformas utilizando *Anchor Handling Tug Supply* (AHTS), conduzida por Mendes (2007). Tal problema foi considerado pelo autor uma variação do VRPTW, e apresenta em sua configuração restrições de janela de tempo, precedência entre tarefas, autonomia das embarcações, atendimento integral da demanda, além da requisição simultânea de múltiplos veículos para atendimento da demanda, na qual mais de uma embarcação é exigida para realizar as tarefas. Adotaram-se duas estratégias diferentes de modelagem. Na primeira, representou-se o fluxo de embarcações em uma rede, na qual os nós indicam as tarefas a serem realizadas, e os arcos, as prováveis viagens das embarcações. Cada nó tem associado um conjunto de parâmetros referentes a cada tarefa, entre elas as janelas de tempo, o instante de início, a penalidade por atraso e a quantidade de embarcações por classe. Os arcos da rede representam os prováveis fluxos de embarcações e evitam gerar viagens inconsistentes. Na segunda estratégia, o foco consistiu em determinar o instante de início de cada tarefa e ao mesmo tempo definir as embarcações para executar a tarefa, usando uma escala de tempo discretizada. Em ambas as estratégias de modelagem, a função objetivo é minimizar os custos das variáveis da operação e os custos associados ao nível de serviço no atendimento. Para solucionar o problema o autor empregou o algoritmo B&C acoplado às heurísticas de busca na vizinhança *local branching* e VNS. Para gerar as soluções iniciais foram empregados os métodos *feasibility pump* e uma heurística construtiva. A pesquisa desenvolvida se mostrou limitada quanto à capacidade de resolver problemas de grande porte.

No campo de pesquisa da logística *offshore* também foram encontrados trabalhos que mesclavam técnicas de otimização e simulação, a fim de dimensionar a frota (RIBEIRO e IACHAN, 2009) e verificar possibilidades de melhorias no transporte de carga para plataformas *offshore* (LEITE, 2012).

Ribeiro e Iachan (2009), que fazem parte da área de Pesquisa Operacional da Petrobras, abordaram o problema real de determinar a quantidade e a composição da frota de embarcações supridoras das plataformas a ser contratada nos anos subsequentes. Primeiramente, considerando que a embarcação pode realizar várias rotas em um período de

análise pré-estabelecido, os autores propuseram um modelo com base no *Vehicle Routing Problem with Multiple Trips* (VRPMT), cujo objetivo é minimizar a distância total percorrida e o número de veículos usados. O modelo abrange a diferenciação de tipos de carga e unidades marítimas; as capacidades das embarcações calculadas em termos de área ocupada e peso; a priorização de cargas; a compatibilidade de embarcação com tipo de plataformas; janelas de tempo; transbordo entre plataformas e não permite entregas fracionadas. Assume-se um tempo máximo de rota é de 3 dias. Contudo, como o modelo não seria capaz de lidar com instâncias de tamanho real e envolve três parâmetros desconhecidos que deveriam ser tratados como variáveis aleatórias. Dessa forma, para lidar com as características aleatórias e solucionar o problema, propôs-se um modelo de simulação que usa uma heurística de roteamento de veículos para simular a entrega das cargas, baseada na heurística construtiva de inserção de Dullaert *et al.*(2002), e um modelo de programação inteira, formulado como um problema de particionamento de conjuntos, para alocar as rotas às embarcações de maneira ótima. O modelo de simulação foi programado em C# no Visual Studio 2005 e o modelo de programação inteira foi resolvido no *software* CPLEX 11. As soluções encontradas pelo modelo foram usadas pela Petrobras no planejamento da contratação das embarcações para os anos de 2009 e 2010.

Leite (2012) realizou um estudo com o objetivo de verificar a viabilidade de melhoria nas operações de transporte marítimo de carga de convés para as unidades de Bacia de Campos operadas pela Petrobras. Primeiramente, para identificar oportunidades de melhoria, o autor fez uma análise empírica das operações referentes ao transporte de carga de convés a partir de um exemplo real e comparou com os resultados obtidos pela programação robusta de Halvorsen-Weare e Fagerholt (2011) e dois dos casos apresentados por Kaiser e Snyder (2010). Entre as possibilidades de melhoria identificadas a partir do exemplo, citam-se: a necessidade de mais viagens semanais em *clusters* em relação ao que é planejado pela empresa; a redução o número de unidades marítimas por viagem e o número de revisitas a uma mesma UM na mesma viagem, que atualmente são elevados; a diminuição do tempo de transporte entre o porto e as UM's. Em seguida, o autor propôs uma política de serviço e, para avaliá-la, fez uma simulação computacional por meio de vários cenários. Tal política visava reduzir o número de visitas às UM's e o número de unidades atendidas por viagem, considerando janelas de tempo e rotas fixas, e clusterização das UM's. O objetivo era estudar os impactos de diferentes políticas de atendimento na robustez do sistema e não encontrar a melhor programação ou a melhor rota. A simulação desenvolvida é constituída por quatro

fases. Na primeira, aplicou-se o método Clarke e Wright para efetuar a clusterização das UM's, considerando as restrições de capacidade das embarcações e número de unidades por viagem. Na segunda fase, estruturou-se uma programação com horários de atracação igualmente espaçados para todos os *clusters*. Na terceira fase, alocou-se a demanda à cada viagem segundo a grade de tempo, sem considerar a capacidade da embarcação. Na quarta fase, executou-se a simulação para determinar, entre outros, o tempo médio de transporte entre o porto e as unidades *offshore* e a composição e tamanho da frota. Por fim comprovou-se a viabilidade de melhorar as operações de transporte marítimo de carga de convés na Bacia de Campos. Observou-se a possibilidade de reduzir tempos de transporte entre o porto e as UMs, os atrasos nas atracações, a quantidade de embarcações e a distância total de navegação.

No que se refere ao uso apenas de técnicas de simulação para dimensionar a frota e efetuar o planejamento operacional para operações *offshore*, alguns modelos foram propostos com o intuito de incluir fatores estocásticos como condições climáticas, e variações nas demandas. Entre eles, Batista (2005) criou um modelo para simular operações do Porto de Imbetiba, em Macaé-RJ, com foco na movimentação de embarcações de apoio marítimo da Bacia de Campos. Utilizou-se o *software* Arena para simular o sistema, em que a modelagem representa a movimentação das embarcações, no que se refere à operação no píer e à criação de filas para atracação. Apesar de discutir o modelo, o trabalho não apresenta as melhores formas de operar o porto.

Aneichyk (2009) desenvolveu um modelo de simulação de eventos discretos para as operações de suprimento *offshore* realizados por PSVs a fim de dimensionar a frota da Statoil e auxiliar o planejamento operacional, considerando muitos fatores estocásticos, como as condições climáticas, atrasos na base *onshore* e requisição de visitas extras a partir de uma instalação *offshore*, os quais podem influenciar a programação semanal do navio, resultando em atrasos e falta PSV. Para implementar o modelo foi usado o Arena 9.0.

Maiusik e Gribkovskaia (2014) propuseram um modelo de simulação de eventos discretos para avaliação de configurações de tamanhos alternativos de frota, levando em consideração a incerteza das condições climáticas e taxas futuras de contratação de embarcações de curto prazo. A contribuição deste trabalho está no desenvolvimento do modelo de simulação original para determinar o custo-benefício do tamanho da frota para operações anuais de navio de suprimento, e na modelagem de durações de serviços dependentes do tempo e durações de navegação. O modelo foi validado e testado em uma programação semanal de navios real de uma empresa de petróleo e gás da Noruega, em que 8 viagens são programadas para atender

22 instalações *offshore*, usando Arena 13.0. A análise dos resultados mostrou que a decisão de a empresa contratar quatro navios em contrato de longo prazo é de fato a configuração custo-benefício ideal.

Também no contexto *offshore*, foram realizados estudos para promover análises empíricas por Kaiser (2010) e Kaiser e Snyder (2010). Kaiser (2010) desenvolveu uma estrutura metodológica para quantificar o número de viagens de navios de suprimento e de tripulação feitas a partir de portos de apoio às atividades *offshore* na região costeira do Golfo do México. A rede logística foi modelada como um sistema determinístico linear invariante no tempo e implementado usando um modelo *input-output*. O dado de input é a atividade *offshore* esperada por bloco de área e nível administrativo durante um período de tempo especificado. O algoritmo apresenta as seguintes etapas: estimar o número e o tipo de navios necessários para apoiar um determinado nível de atividade offshore; estimar a duração da atividade, o tipo de embarcações necessárias, e o fator de circuito da frota; atribuir atividade dos navios para bases de apoio *onshore*. O *output* é o número de viagens por base portuária e tipo de embarcação para o mesmo período de tempo. O objetivo do autor foi compreender os impactos econômicos e ecológicos no uso dos navios. O autor também mostrou que seus resultados poderiam ser usados como uma base para decisões de investimento em infraestrutura.

Kaiser e Snyder (2010) fizeram uma revisão das atividades e necessidades logísticas envolvidas na exploração e desenvolvimento *offshore* com enfoque nos fluxos de trabalho e no uso das embarcações de apoio no Golfo do México. A principal contribuição do artigo é fornecer uma análise empírica a respeito dos navios de suprimento, apresentando dados que podem servir para a previsão de consequências na infraestrutura, no meio ambiente, na saúde pública e na economia da escolha de determinada alternativa de desenvolvimento *offshore*.

3 METODOLOGIA

Este capítulo engloba a apresentação da metodologia de pesquisa adotada, incluindo a classificação e as etapas da metodologia proposta.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA

Para classificar a metodologia de pesquisa adotada, assumiu-se a taxonomia proposta por Silva e Menezes (2005), que a qualifica em relação à natureza, à abordagem, ao objetivo e ao procedimento técnico.

Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada, pois visa gerar conhecimentos para a aplicação prática do problema de roteamento de navios de suprimentos de apoio a plataformas *offshore*.

No que tange à abordagem, a pesquisa é quantitativa, uma vez que o universo de estudo pode ser quantificável, ou seja, as informações podem ser transformadas em relações numéricas, comparadas e analisadas.

No que concerne aos objetivos, a pesquisa é exploratória, pois busca proporcionar maior familiaridade com o problema de roteamento de navios do tipo PSV para atender à plataformas *offshore*, por meio de levantamentos bibliográficos e entrevistas. Neste caso, foram realizadas pesquisas aprofundadas sobre o tema, ainda recente na literatura, bem como reuniões presenciais com uma equipe que atua na maior empresa petroleira do país, no setor responsável pela distribuição de suprimentos para plataformas *offshore*.

No que se refere ao procedimento técnico, a pesquisa é bibliográfica e usa modelagem matemática.

Segundo Vergara (2011), a pesquisa bibliográfica compreende o estudo sistematizado realizado a partir de material publicado em livros, artigos de periódicos e outros e, fornece instrumento analítico para outros tipos de pesquisa.

A pesquisa bibliográfica abrangeu, sobretudo, a pesquisa de artigos científicos em bases como *Science Direct, Wiley Online Library, IEEE Xplore, Scielo, Scopus, Domínio Público* e *Emerald*. Primeiramente, procuraram-se todos os artigos com a palavra-chave 2L-CVRP. Com base no levantamento inicial, avaliaram-se os artigos e identificaram-se os principais autores citados. A análise de cada artigo englobou a identificação da abordagem de solução proposta para a resolução de problemas 2L-CVRP, bem como as principais características

relativas a variantes. Fez-se, de forma análoga, nas buscas por artigos referentes ao tema de logística *offshore*, usando palavras-chave como *"ship routing and scheduling"*, *"fleet composition"*, *"maritime transportation", "supply operations"*. A literatura sobre transporte marítimo é bastante vasta, mas o foco eram artigos que tivessem promovido análises envolvendo navios de apoio a plataformas. Também se efetuou uma procura para verificar se havia algum problema de roteamento de navios de suprimento de plataformas que abordasse a questão do carregamento bidimensional, mas nenhum foi encontrado. Além das bases citadas, estendeu-se a busca no *google scholar*, a fim de encontrar pesquisas nacionais relativas ao tema.

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), a modelagem consiste em um método de pesquisa quantitativo que deve ser utilizado para avaliar o impacto de mudanças em um sistema. O modelo quantitativo expressa a relação entre uma variável dependente e outra independente, e busca entender o quanto a última interfere ou explica a primeira. Formula-se o problema operacional em termos matemáticos, e técnicas de solução exatas ou aproximadas possibilitam encontrar a solução ótima ou próximas ao ótimo global, respectivamente. As análises advindas dos resultados obtidos pelo método servem de apoio à tomada de decisão.

O processo de modelagem nesta dissertação envolve a elaboração do modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) aplicado à logística *offshore* e a avaliação da PLIM a partir dos resultados obtidos por testes computacionais.

3.2 ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA PROPOSTA

Para alcançar o objetivo do trabalho precisou-se determinar uma metodologia de pesquisa a ser seguida. Esta metodologia foi dividida em sete fases, compostas por um total de 15 etapas, apresentadas na sequência.

- Fase I: Elaboração e definição do problema do estudo
  1. Visitar a Petrobras: para ter conhecimento do negócio e processos realizados na logística *offshore* e, a partir disso, elaborar e definir o problema do estudo.

- Fase II: Elaboração de Fundamentação Teórica

2. Levantar bibliografias: a fim de entender o tema de pesquisa, devem-se estudar os problemas de roteamento de veículos e, especificamente, o 2L-CVRP; e estudar a logística

offshore, bem como os modelos aplicados a roteamento de navios e plataformas, sobretudo, estudos voltados para o uso de navios do tipo PSV.

Esta fase, juntamente com a primeira, permitiu construir o conhecimento a respeito dos tipos de variáveis e parâmetros que estão envolvidos no problema estudado, dando o embasamento sobre como construir o modelo e quais dados precisavam ser levantados.

- Fase III: Proposição do modelo matemático

3. Propor o modelo PLIM: a partir dos levantamentos da literatura sobre logística *offshore*, e problemas integrados de roteamento e carregamento bidimensional, formular o modelo de Programação Linear Inteira Mista incorporando elementos do 2L-CVRP e do problema de atendimento a plataformas *offshore* por navios de suprimento.

- Fase IV: Levantamento de dados e informações na Petrobras

4. Levantar dados: levantar parâmetros referentes ao transporte de cargas por navios de suprimento de plataformas *offshore* junto à Petrobras.

- Fase V: Criação de instâncias para o modelo PLIM

5. Calcular a Matriz de Distâncias: a partir das latitudes e longitudes obtidas para o porto e as plataformas, calcular a distância das plataformas entre elas e em relação ao porto. A matriz de distância é dada em Km.
6. Organizar dados das embarcações: preparar dados dos diferentes tipos de navios quanto às dimensões do convés (largura e comprimento em metros), às capacidades em toneladas, à velocidade média e à quantidade disponível.
7. Calcular Matriz de Tempo: dividir a matriz de distância pela velocidade média das embarcações, que, para este problema, foi considerada igual para os diferentes tipos de navios.
8. Organizar dados de tempos: preparar dados referentes ao tempo limite que um navio pode permanecer atendendo plataformas sem retornar ao porto; ao tempo médio para carregar o navio no porto e ao tempo médio para atender às plataformas.
9. Organizar dados das cargas: preparar dados dos diferentes tipos de cargas em relação às dimensões (largura e comprimento em metros), às capacidades em toneladas, e à

quantidade demandada. Quando se usa “diferentes tipos de carga”, refere-se aos diferentes formatos e pesos. Neste trabalho abordou-se o transporte de carga geral, que pode ser tratada em termos bidimensionais. Não se tratou o transporte de água, diesel e granéis.

10. Criar conjunto de instâncias baseadas em dados reais.

- Fase VI: Aplicação do Modelo PLIM para roteamento de embarcações *offshore* e arrumação de carga

11. Executar modelo PLIM para roteirizar e arrumar carga: executar o modelo PLIM a usando as instâncias criadas.

12. Gerar solução: gerar a solução do modelo PLIM, que deve retornar a rota realizada por cada navio, a partir da qual se infere a distância percorrida; a somatória de custos fixos e custos variáveis; a quantidade e o tipo de navio usado; o momento de cada navio e os valores de variáveis de posicionamento da carga (α, β, γ).

- Fase VII: Tratamento de resultados

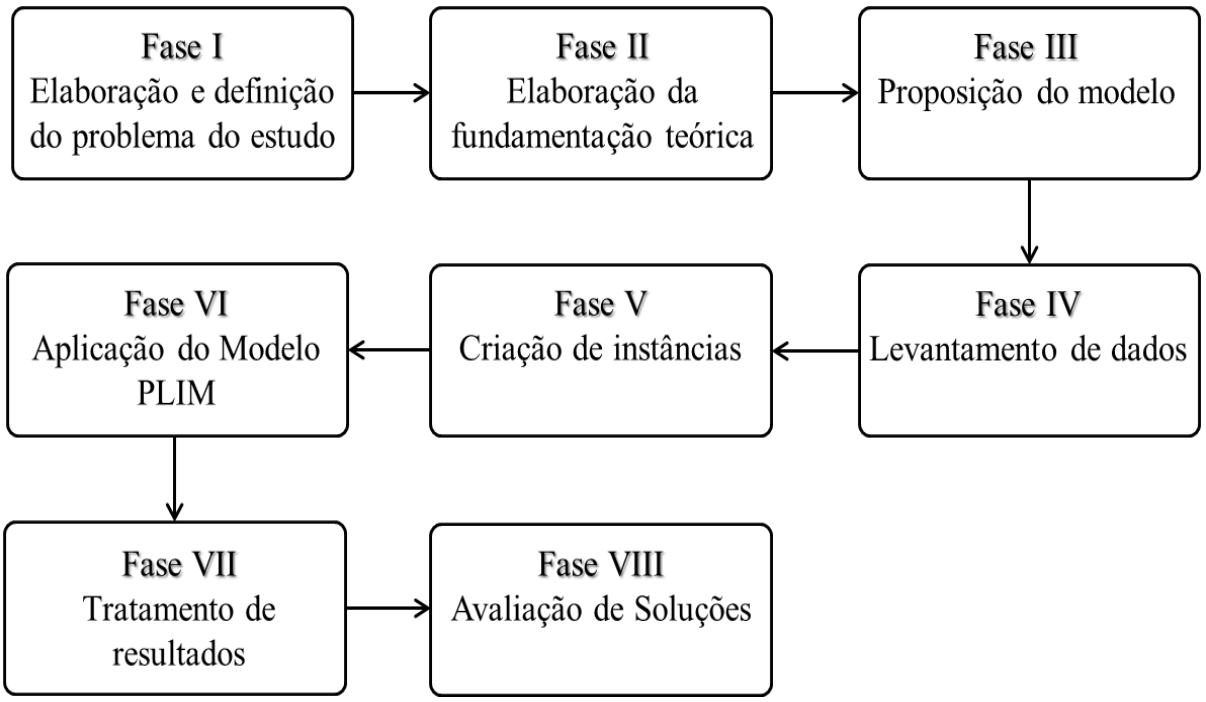
13. Tratar a solução: organizar os valores da solução obtida em uma planilha do MS Excel sob a forma de tabela apresentando o nome da instância, a função objetivo; a distância navegada (Km); o número de navio usados; o *gap*; *Lower Bound* (LB) *e Upper Bound* (UB) caso o *gap* seja diferente de 0,00%; o tempo de execução em segundos; o valor do momento em t.m; e as rotas de cada navio. Além disso, a partir do valor das variáveis de posicionamento e das dimensões das cargas e convés dos navios, gerar automaticamente, por meio de uma macro, os desenhos esquemáticos da arrumação da carga no convés.

- Fase VIII: Avaliação de Soluções

14. Comparar e analisar resultados: realizar a comparação de algumas das instâncias com a situação real e avaliar ganhos em termos de distância navegada, bem como fazer análises de como o modelo se comporta com instâncias de maior escala.

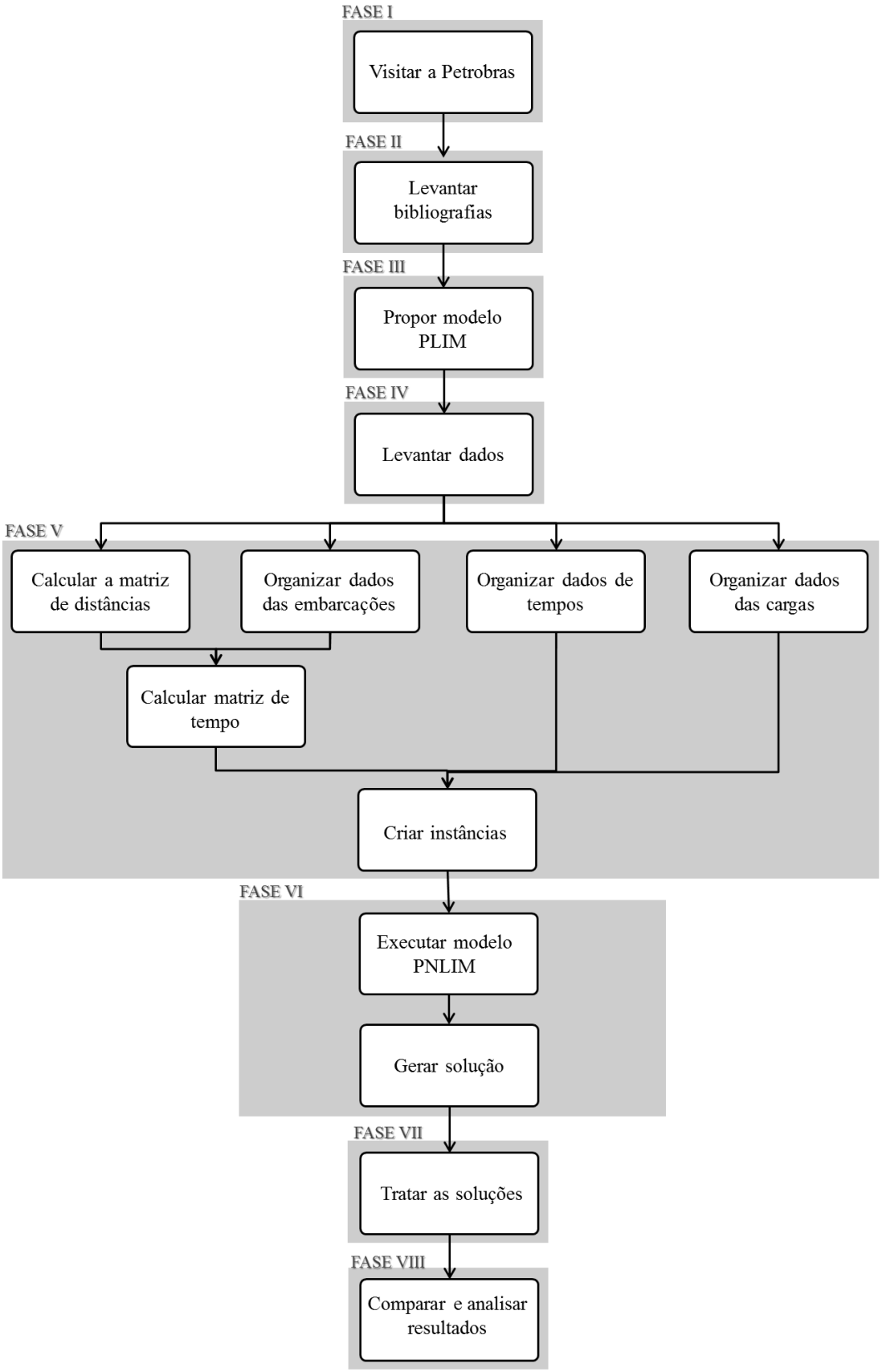
A Figura 17 mostra a ordenação das fases da metodologia estabelecida, e a Figura 18 exibe o detalhamento destas fases.

Figura 17 - Fases da Metodologia de Pesquisa



Adaptado de Mapa (2007)

Figura 18 - Fases da Metodologia de Pesquisa detalhadas



Adaptado de Mapa (2007)

O desenvolvimento das fases I, III, IV, V e VI é relatado a seguir. Destaca-se que para a fase de proposição do modelo são apresentadas as ideias de concepção do modelo, o *software* usado para os experimentos e a solução esperada. O modelo proposto, por ser o conteúdo mais importante deste trabalho, é colocado em um capítulo à parte.

3.2.1 Descrição do Problema

Nesta seção apresenta-se o problema abordado nesta dissertação, que compreende a parcela de transporte marítimo da cadeia de suprimentos *offshore*. Especificamente, estuda-se o problema de roteamento de navios de suprimento para plataformas *offshore*. A solução proposta consiste em criar rotas e arrumar a carga no convés dos navios, prevendo o equilíbrio náutico, a partir das demandas das instalações *offshore*.

Considerando-se um único porto de operação das embarcações, o problema é descrito da seguinte maneira. Uma frota heterogênea de navios do tipo PSV começa e termina seu trajeto em uma base de apoio, visitando, durante a rota, uma ou mais plataformas. Em uma rota é permitida apenas uma visita por plataforma. O período de planejamento é de um dia e para cada rota é atribuído um único navio. As plataformas consideradas são de produção, portanto, assume-se que as posições das instalações são estacionárias durante o período de planejamento. Serão considerados apenas pedidos de entregas de cargas por parte das plataformas. Solicitações referentes à coleta de carga não serão tratadas nesse trabalho. Restrições referentes à capacidade da plataforma e janelas de tempo também não são consideradas, mas há um tempo limite de operação do navio. Assume-se uma velocidade média constante igual para todos os navios. Entre os tempos tratados no problema, incluem-se: tempo de carregamento do navio no porto, tempo de atendimento da plataforma e tempo de navegação, calculado com base na matriz de distância dividida pela velocidade dos navios.

O número de navios de cada tipo dentro do horizonte de planejamento é predeterminado. A capacidade varia dependendo do tipo de embarcação. A restrição de capacidade de um navio é dada em termos de peso (toneladas) e de área ocupada (m^2). Além disso, consideram-se restrições para promover a arrumação bidimensional das cargas no convés do navio, respeitando-se a não sobreposição de cargas e os limites de largura e comprimento do navio. Produtos a granel, bem como o transporte de diesel e água não são considerados no problema.

A função objetivo visa minimizar os custos fixos e variáveis, diretamente relacionados com a quantidade de navios usados e com a distância navegada, respectivamente, o momento de

cada navio, a fim de se atingir o equilíbrio náutico e o comprimento ocupado no navio, para criar uma arrumação mais ajustada.

O problema, portanto, pode ser resumido pelas seguintes características:

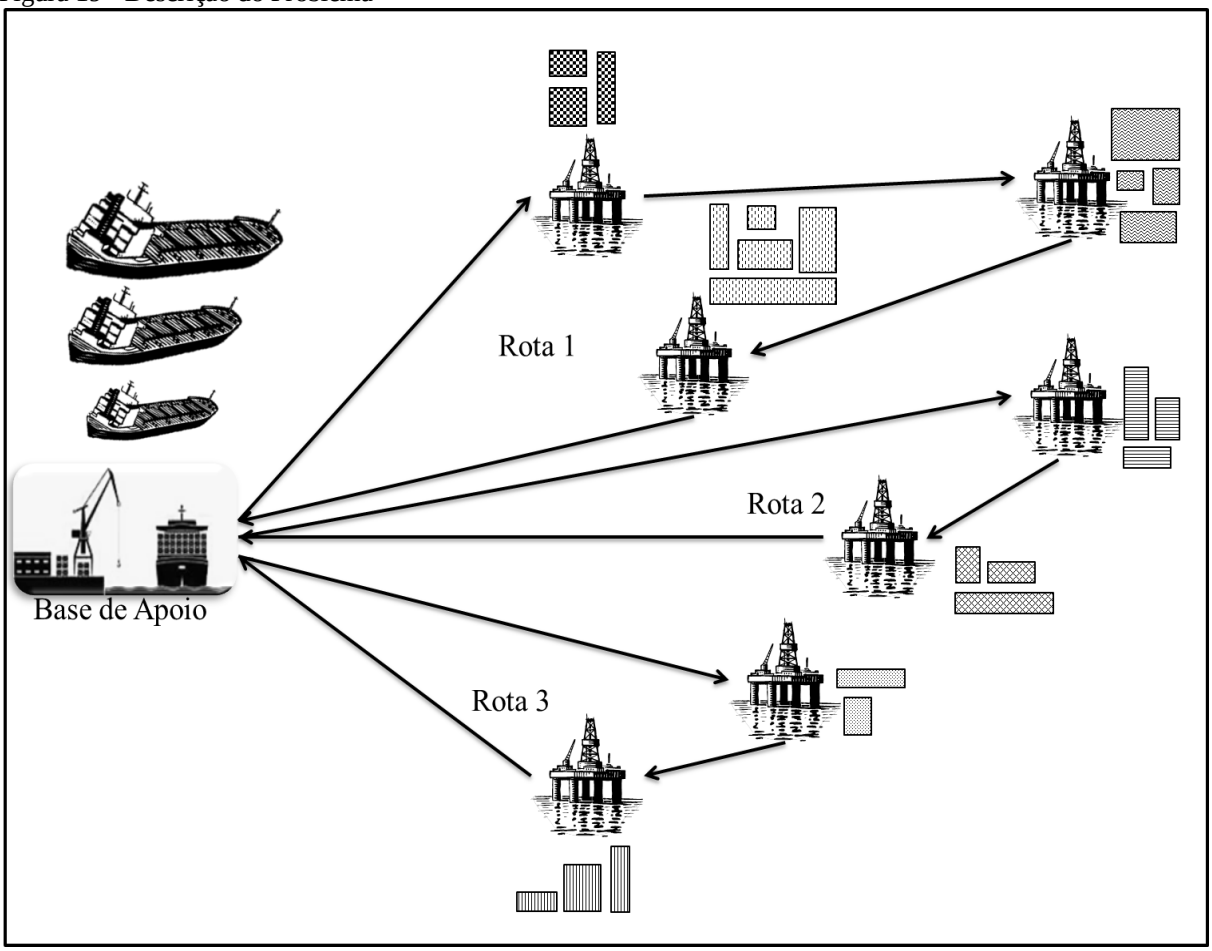
- A base de apoio tem uma localização geográfica determinada;
- Cada unidade marítima tem uma localização geográfica determinada;
- A frota é heterogênea, composta de diferentes embarcações do tipo PSV;
- Cada embarcação tem como atributos associados a largura e o comprimento do convés de carga em metros; os custos fixos e variáveis em R$; e a capacidade em toneladas.
- Cada embarcação pode transportar apenas cargas gerais no convés;
- Assume-se uma velocidade média igual para todas as embarcações;
- A demanda de cada plataforma é dada em termos de dimensões das cargas (largura e comprimento em metros), peso de cada carga em toneladas e quantidade de cargas.

Em função dessas características, a solução desse problema de transporte marítimo deve gerar as rotas e a arrumação das cargas no convés das embarcações considerando que:

- Todas as plataformas devem ser atendidas;
- As unidades marítimas só podem ser visitadas por uma única embarcação por dia;
- A alocação de cargas às embarcações deve respeitar as características das mesmas, em termos de limite de capacidade de peso e limites dimensionais do convés.

A Figura 19 ilustra o problema descrito, apresentando a frota heterogênea na base de apoio, as rotas efetuadas por cada embarcação e as cargas entregues à cada plataforma.

Figura 19 - Descrição do Problema



3.2.1.1 Delimitação do Escopo

Diante da revisão apresentada, nota-se que a solução do problema real de roteamento e programação de embarcações *offshore*, em geral, abrange (LOPES, 2011):

- Minimizar os custos fixos (proporcional à quantidade de navios na frota) e custos variáveis (normalmente associados à distância navegada);
- Realizar entregas de cargas no prazo ou minimizar os atrasos nas entregas;
- Não exceder a capacidade dos diversos tipos de navios para os diferentes tipos de carga considerando as operações de *upload* e *backload*;
- Não ultrapassar o número de embarcações disponíveis de cada tipo.

Trata-se, portanto, de um problema bastante complexo. Para esta dissertação foram adotadas algumas simplificações, apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Escopo do Trabalho relativo ao Problema de Roteamento de PSVs

	Problema de Roteamento de Embarcações *offshore*	**Escopo do Trabalho**
Frota heterogênea	✓	✓
Janela de tempo	✓	
Coleta e Entrega	✓	
Múltiplas Viagens	✓	
Diferentes tipos de carga	✓	
Tempo Limite de Duração da Rota	✓	✓
Limitação da Frota	✓	✓

Dessa forma, para propor o modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o problema considerar-se-á as seguintes características: frota heterogênea, tempo limite de duração da rota e limitação da frota, ou seja, não poderão ser usados mais navios além dos que são disponibilizados para a resolução do modelo.

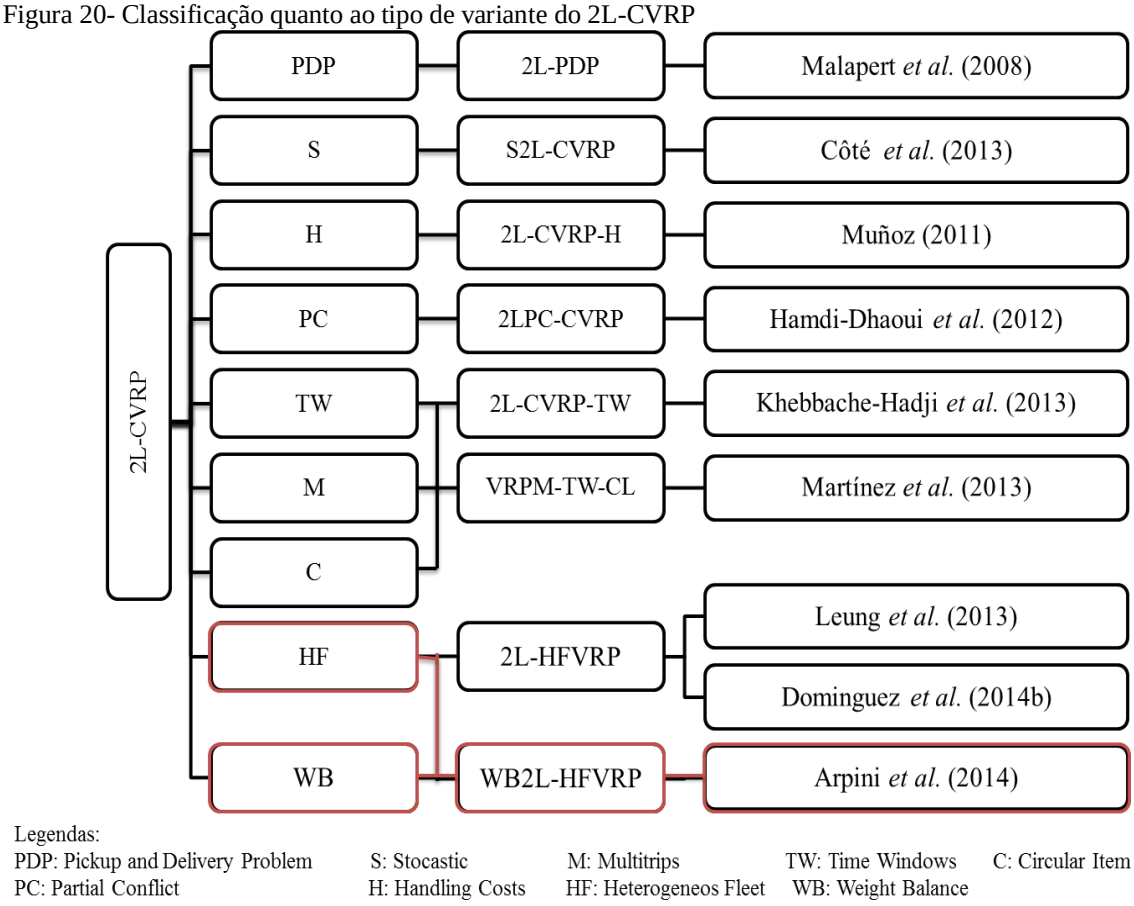
Ressalta-se que também foram assumidas simplificações quanto aos custos variáveis, pois além da distância, estes custos podem ser influenciados por outros fatores como, por exemplo, o consumo de combustível, que por sua vez, associa-se não apenas ao trajeto percorrido, mas também ao tempo em que o navio está parado para atender a uma plataforma, e isso não foi considerado.

Outros aspectos simplificados em relação ao problema real foram: o transporte apenas de carga geral; a realização somente de operações de entrega de cargas para as unidades marítimas, desconsiderando *backload* e *transbordo*; a consideração de navios do tipo PSV; e o uso de apenas um tipo de plataforma, neste caso, plataformas de produção em virtude das características de demanda mais estável, localização fixa e por serem os únicos tipos de plataforma cuja informação acerca da localização é pública. Ou seja, não seria possível incluir plataformas de perfuração, pois os dados são sigilosos.

No que se refere à componente de carregamento do modelo proposto, o escopo deste trabalho se enquadra na categoria 2|UO|L, uma vez que as cargas serão retiradas pela parte superior do convés por meio de um guindaste, isentando a necessidade de se inserir a restrição de sequenciamento. Como o problema apresentado tratará, simultaneamente, de frota heterogênea e equilíbrio náutico, e essa característica ainda não foi abordada na literatura, isso definirá uma nova variante de 2L-CVRP, denominada, neste trabalho de *Weight Balance*

Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (WB2L-HFVRP), conforme mostra a Figura 20.

Figura 20- Classificação quanto ao tipo de variante do 2L-CVRP



3.2.2 Proposição do Problema de Roteamento de Embarcações *Offshore* com Restrições de Carregamento Bidimensional

A partir da definição do problema de atendimento de plataformas *offshore* por navios do tipo PSV, foi proposto um modelo baseado no 2L-CVRP.

Há três etapas associadas ao desenvolvimento do modelo PLIM: definição, modelagem e solução. Na fase da definição do problema, determinou-se que o objetivo do modelo matemático proposto estaria relacionado à otimização de transporte e arrumação das cargas de suprimento a plataformas *offshore*. A partir disso, definiu-se a função objetivo como a minimização dos custos fixos e variáveis, diretamente proporcionais à quantidade de navios usados e à distância navegada, respectivamente, da diferença de peso entre os bordos no navio, visando o equilíbrio náutico, e do comprimento ocupado pelas cargas no convés do navio. Destaca-se que a presença do fator “comprimento ocupado” na função objetivo serve

para auxiliar na arrumação ótima, juntamente com as restrições presentes no modelo. Caso esse aspecto não fosse considerado, a tendência seria que as cargas ficassem centralizadas no convés, devido ao equilíbrio náutico.

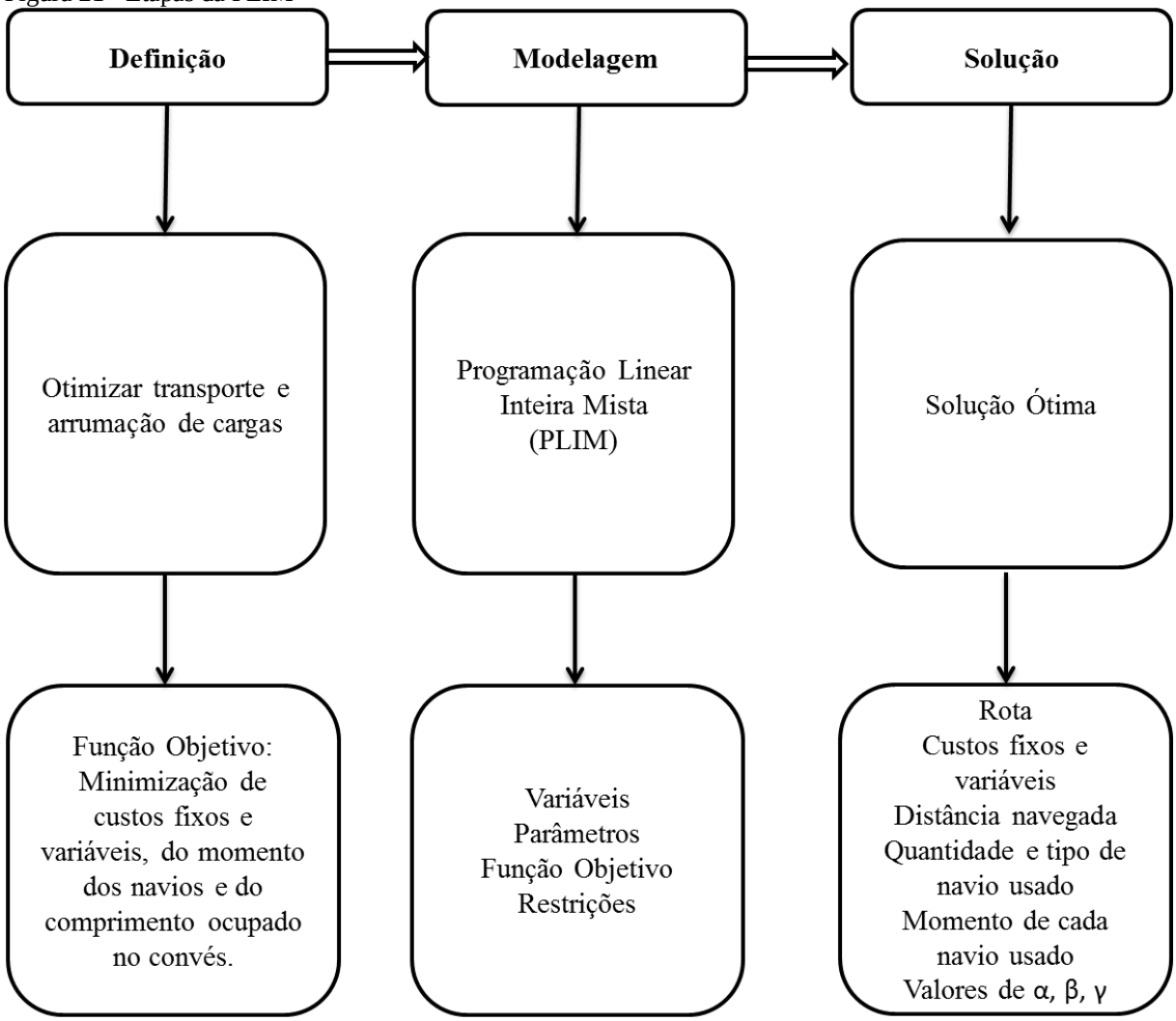
Na fase de modelagem, construiu-se a PLIM segundo os parâmetros e variáveis levantados, a partir dos quais se estruturaram a função objetivo e as restrições operacionais relacionadas ao problema de roteamento e ao problema de carregamento. Para implementar o modelo PLIM, optou-se pelo uso do *software* CPLEX versão 12.6. Essa escolha baseou-se no fato de que a linguagem de modelagem OPL apresenta uma sintaxe que é próxima da formulação matemática, o que facilita a compreensão e o uso da ferramenta. Adicionalmente, a interface do *software* permite uma separação entre o modelo e a instância numérica de dados, o que possibilita a geração de diferentes instâncias sem a necessidade de modificar a estrutura básica do modelo. Também se acrescenta o fato de ser um *software* bastante usado no meio científico, conforme apresentado na revisão da literatura.

Para resolver o problema de PLIM no CPLEX, primeiramente linearizou-se o modelo por meio da inserção de restrições, em seguida escreveu-se o modelo matemático na linguagem OPL no arquivo ".mod" , cadastraram-se os parâmetros em vários arquivos ".dat" que se referem às diferentes instâncias construídas, e executou-se o modelo para cada instância.

Por fim, na fase de solução, o intuito é gerar uma solução ótima, pois se trata de uma abordagem exata. A solução deve retornar a rota realizada por cada navio, a partir da qual se infere a distância percorrida; a somatória de custos fixos e custos variáveis; a quantidade e o tipo de navio usado; o momento de cada navio e os valores de variáveis de posicionamento da carga (α, β, γ).

A Figura 21 sumariza as etapas de definição, modelagem e solução do modelo PLIM.

Figura 21 - Etapas da PLIM



Fonte: Adaptado de Mapa (2007)

3.2.3 Levantamento de dados

O levantamento de dados para o problema abrangeu algumas reuniões e troca de e-mails com uma equipe atuante no setor responsável pela distribuição de suprimentos para plataformas *offshores* em Vitória/ES. Nestas reuniões buscou-se compreender como funciona o atendimento de plataformas *offshore* por PSVs. Apuraram-se os seguintes aspectos:

- Informações sobre a forma como o problema é solucionado atualmente pela equipe. Segundo a equipe, o SAP sugere uma rota usando o método do vizinho mais próximo, contudo esta sugestão é analisada em virtude de prioridades de atendimento. Então, se necessário, constrói-se uma nova rota manualmente.
- Localização das plataformas marítimas e de portos, em termos de latitude e longitude. Conseguiram-se os dados quanto às plataformas da Bacia do Espírito Santo atendidas pelo

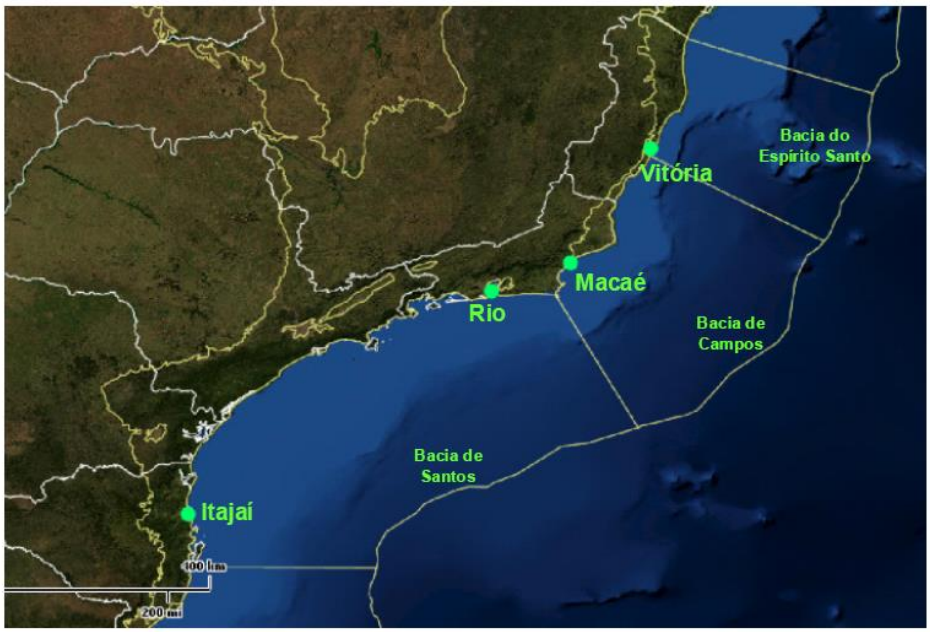
CPVV. Por questões de sigilo, só há oito plataformas da Bacia do Espírito Santo cujos dados podem ser divulgados. Como é uma quantidade limitada de plataformas para efetuar testes computacionais, obtiveram-se também dados a respeito das plataformas da Bacia de Campos, que possui uma quantidade maior de plataformas cuja posição pode ser divulgada.

- Atributos referentes às cargas solicitadas pelas plataformas, como quantidades, peso em toneladas e dimensões em termos de largura e comprimento em metros.
- Dados relativos ao tipo de PSV utilizado, englobando capacidade máxima; velocidade média; dimensões do convés em termos de largura e comprimento; custos fixos e custos variáveis por quilômetro. Há três tipos de PSV cujos parâmetros são diferentes, com exceção da velocidade e tempos adotados;
- Tempo máximo de retorno das embarcações para o porto;
- Tempos médios de carregamento no porto e tempo para atendimento das plataformas, que consiste no tempo para retirar a carga no navio e colocá-la na plataforma. Foi adotado o mesmo valor médio para todas as plataformas;

Para efetuar comparações entre distâncias navegadas, teve-se acesso a alguns manifestos de carga da Petrobras, os quais informam a rota realizada, indicando as plataformas, o tipo de PSV usado, e a relação de cargas com seus respectivos atributos.

A Figura 22 ilustra as bases de apoio onde a Petrobras opera, bem como a delimitação das Bacias (LOPES, 2011).

Figura 22 - Localização das principais bases de apoio offshore operadas pela Petrobras e delimitação das Bacias



Fonte: Lopes (2011)

A seguir são apresentados os dados coletados para a execução do modelo considerando a Bacia do Espírito Santo.

O local de origem do problema é a Companhia Portuária de Vila Velha (CPVV), que é o maior porto de apoio a plataformas *offshore* do Espírito Santo, enquanto os locais de destino são compostos pelas plataformas FPSO (*Floating Production Storage Offloading*) e plataformas tipo jaqueta. As plataformas FPSO são unidades estacionárias flutuantes, enquanto plataformas tipo jaqueta possuem uma localização fixa. O termo plataforma é usado neste trabalho tanto para designar plataformas FPSO quanto jaqueta.

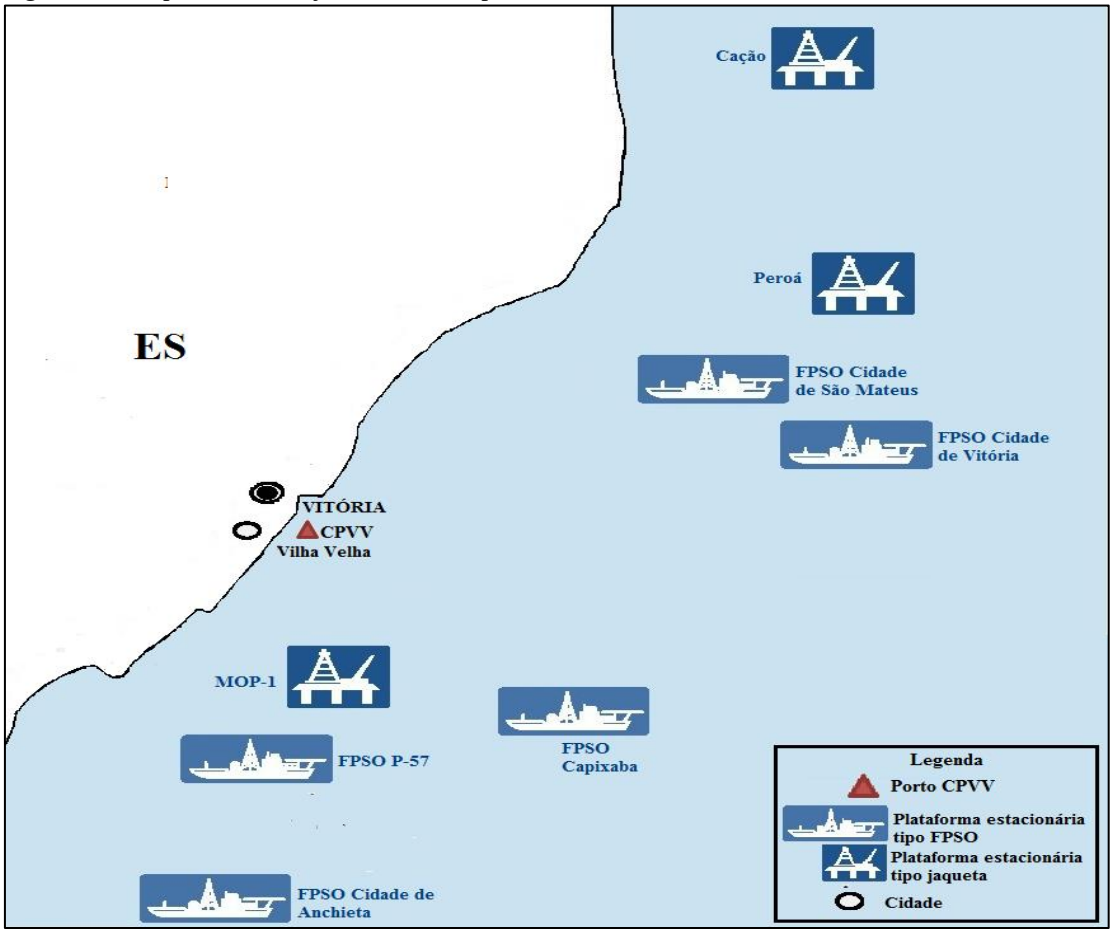
Consideraram-se as seguintes plataformas da Bacia do Espírito Santo operadas pela Petrobras: FPSO P-57, FPSO Cidade de Vitória, FPSO Cidade de São Mateus, FPSO Capixaba, FPSO Cidade de Anchieta, Campo Peroá (PPER), Campo Cação (PCA), Módulo de Operação de Pigs (MOP-1). A Tabela 1 apresenta a localização da CPVV e das plataformas em termos de latitude e longitude e a Figura 23 ilustra o posicionamento das plataformas na bacia do Espírito Santo bem como a posição da CPVV em relação às cidades de Vitória e Vila Velha.

Tabela 1- Posicionamento georreferencial para a CPVV e as plataformas da Bacia do ES

Nome	Código	Latitude	Longitude
Companhia Portuária de Vila Velha - CPVV	CPVV	-20,32240	-40,32040
FPSO P-57	P57	-21,23750	-40,04750
FPSO Cidade de Anchieta	CDAN	-21,33750	-40,05722
FPSO Cidade de Vitória	CVIT	-20,04278	-39,52556
FPSO Cidade de São Mateus	CDSM	-19,96611	-39,63389
FPSO Capixaba	CAPX	-21,23722	-39,95583
Módulo de Operações de Pigs	MOP-1	-20,98083	-40,41194
Campo Peroá	PPER	-19,55139	-39,25639
Campo Cação	PCA	-19,09889	-39,65361

Fonte: Petrobras (2014)

Figura 23 - Mapa da localização relativa das plataformas da Bacia do ES e da CPVV



Fonte: Adaptado da Página de A Gazeta (2014)[6].

Os dados coletados para a execução do modelo considerando a Bacia de Campos são mostrados a seguir.

O local de origem para a Bacia de Campos é o Terminal Alfandegado de Imbetiba (TAI), que é a maior base de apoio *offshore* no Brasil, situada em Macaé-RJ. Trata-se de um terminal privativo, onde podem operar somente embarcações autorizadas pela Petrobras (LOPES, 2011).

Os locais de destino são compostos pelas 56 plataformas de produção *offshore* da Bacia de Campos operadas pela Petrobras: FPSO Brasil (FPBR), FPSO Cidade de Niterói (FPNT), FPSO Rio de Janeiro (FPRJ), FPSO MARLIM AZUL (FPMLS), FPSO Rio das Ostras (FPRO), FSO Cidade de Macaé (FSME), Petrobras 07 (P-07), Petrobras 08 (P-08), Petrobras 09 (P-09), Petrobras 12 (P-12), Petrobras 15 (P-15), Petrobras 18 (P-18), Petrobras 19 (P-19), Petrobras 20 (P-20), Petrobras 25 (P-25), Petrobras 26 (P-26), Petrobras 27 (P-27), Petrobras 31 (P-31), Petrobras 32 (P-32), Petrobras 33 (P-33), Petrobras 35 (P-35), Petrobras 37 (P-37),

[6] Disponível em: http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2012/06/noticias/a_gazeta/economia/1287494-novos-terminais-e-plataformas-no-estado.html. Acesso em 15 de janeiro de 2014.

Petrobras 38 (P-38), Petrobras 40 (P-40), Petrobras 43 (P-43), Petrobras 47 (P-47), Petrobras 48 (P-48), Petrobras 50 (P-50), Petrobras 51 (P-51), Petrobras 52 (P-52), Petrobras 53 (P-53), Petrobras 54 (P-54), Petrobras 55 (P-55), Petrobras 56 (P-56), Petrobras 57 (P-57), Petrobras 58 (P-58), Petrobras 61 (P-61), Petrobras 62 (P-62), Petrobras 63 (P-63), Petrobras 65 (SS-06/P-65), Plataforma de Carapeba-1 (PCP-1), Plataforma de Carapeba-2 (PCP-2), Plataforma de Carapeba-1 (PCP-3), Plataforma de Cherne-1 (PCH-1), Plataforma de Cherne-2 (PCH-2), Plataforma de Enchova (PCE-1), Plataforma de Garoupa (PGP-1), Plataforma de Namorado-1 (PNA-1), Plataforma de Namorado-2 (PNA-2), Plataforma de Pampo-1 (PPM-1), Plataforma de Pargo-1 (PPG-1A), Plataforma de Pargo-2 (PPG-1B), Plataforma de Rebombeio Autônoma 1 (PRA-1), Plataforma de Vermelho-1 (PVM-1), Plataforma de Vermelho-2 (PVM-2), Plataforma de Vermelho-3 (PVM-3).

A Tabela 2 apresenta a localização do TAI e das plataformas em termos de latitude e longitude.

Tabela 2 - Posicionamento georreferencial para o TAI e as plataformas de Campos

(Continua)

Nome	Código	Latitude	Longitude
Terminal Alfandegado de Imbetiba	TAI	-22,38333	-41,76667
FPSO Brasil	FPBR	-21,93370	-39,81670
FPSO Cidade de Niterói	FPNT	-22,49608	-39,93705
FPSO Rio de Janeiro	FPRJ	-22,85743	-40,36045
FPSO Marlim Azul	FPMLS	-22,53993	-40,02219
FPSO Rio das Ostras	FPRO	-22,91223	-40,68287
FSO Cidade de Macaé	FSME	-22,15709	-40,14651
Petrobras 07	P-07	-22,75796	-40,68525
Petrobras 08	P-08	-22,67128	-40,54773
Petrobras 09	P-09	-22,57221	-40,52888
Petrobras 12	P-12	-22,75821	-40,81779
Petrobras 15	P-15	-22,67692	-40,60556
Petrobras 18	P-18	-22,42676	-40,02992
Petrobras 19	P-19	-22,39097	-40,05609
Petrobras 20	P-20	-22,35736	-40,09043
Petrobras 25	P-25	-22,10896	-39,91654
Petrobras 26	P-26	-22,46696	-40,03012
Petrobras 27	P-27	-22,37902	-40,14731

Tabela 2 - Posicionamento georreferencial para o TAI e as plataformas de Campos

(Continuação)

Nome	Código	Latitude	Longitude
Petrobras 31	P-31	-22,12962	-39,96625
Petrobras 32	P-32	-22,34701	-40,24178
Petrobras 33	P-33	-22,37053	-40,02672
Petrobras 35	P-35	-22,43531	-40,06950
Petrobras 37	P-37	-22,48350	-40,09722
Petrobras 38	P-38	-22,55767	-40,12242
Petrobras 40	P-40	-22,54569	-40,06879
Petrobras 43	P-43	-22,55044	-40,25977
Petrobras 47	P-47	-22,34147	-40,19482
Petrobras 48	P-48	-22,66337	-40,23983
Petrobras 50	P-50	-22,08588	-39,82762
Petrobras 51	P-51	-22,63270	-40,09504
Petrobras 52	P-52	-21,91028	-39,73806
Petrobras 53	P-53	-22,42350	-39,95731
Petrobras 54	P-54	-21,96674	-39,82665
Petrobras 55	P-55	-21,99322	-39,73955
Petrobras 56	P-56	-22,62222	-39,99083
Petrobras 57	P-57	-21,24284	-40,04544
Petrobras 58	P-58	-21,21508	-39,99736
Petrobras 61	P-61	-23,51554	-41,06089
Petrobras 62	P-62	-21,93972	-39,79194
Petrobras 63	P-63	-23,51353	-41,06428
Petrobras 65	SS-06/P-65	-22,70010	-40,67841
Plataforma de Carapeba-1	PCP-1	-22,24336	-40,44435
Plataforma de Carapeba-2	PCP-2	-22,23188	-40,41653
Plataforma de Carapeba-1	PCP-3	-22,24324	-40,44366
Plataforma de Cherne-1	PCH-1	-22,43123	-40,48181
Plataforma de Cherne-2	PCH-2	-22,46429	-40,47010
Plataforma de Enchova	PCE-1	-22,70787	-40,69281
Plataforma de Garoupa	PGP-1	-22,37303	-40,41878
Plataforma de Namorado-1	PNA-1	-22,43693	-40,42584

Tabela 2 - Posicionamento georreferencial para o TAI e as plataformas de Campos

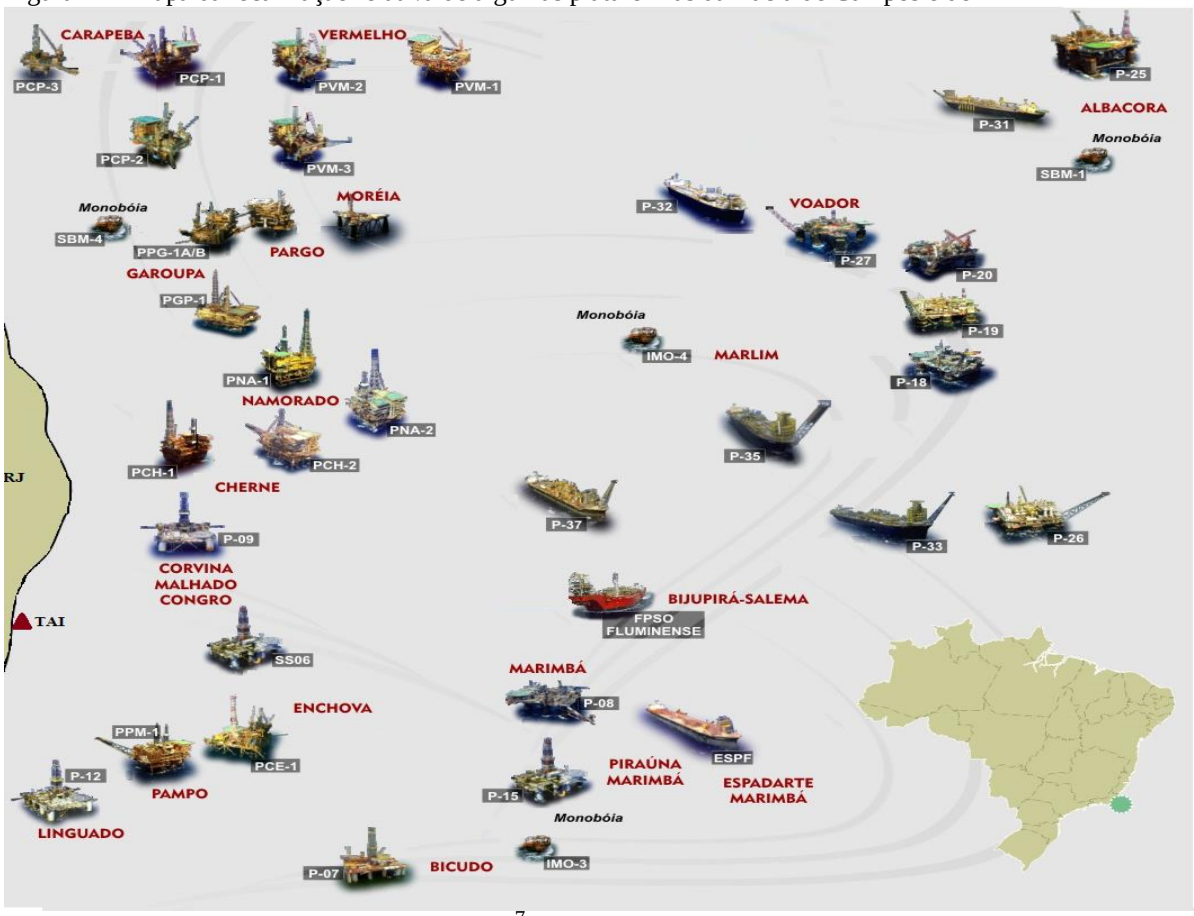
(Conclusão)

Nome	Código	Latitude	Longitude
Plataforma de Namorado-2	PNA-2	-22,44901	-40,41309
Plataforma de Pampo-1	PPM-1	-22,79750	-40,76215
Plataforma de Pargo-1	PPG-1A	-22,25383	-40,33128
Plataforma de Pargo-2	PPG-1B	-22,25419	-40,33063
Plataforma de Rebombeio Autônoma 1	PRA-1	-22,17073	-40,12141
Plataforma de Vermelho-1	PVM-1	-22,15894	-40,28005
Plataforma de Vermelho-2	PVM-2	-22,17364	-40,29280
Plataforma de Vermelho-3	PVM-3	-22,18798	-40,30455

Fonte: ANP (2014)

A Figura 24 demonstra o posicionamento de algumas plataformas na bacia de Campos bem como a posição do TAI.

Figura 24 - Mapa da localização relativa de algumas plataformas da Bacia de Campos e do TAI



Fonte: Adaptado da Página Click Macaé (2015)[7].

[7] Disponível em: http://www.clickmacae.com.br/?sec=361&pag=pagina&cod=545. Acesso em 10 de janeiro de 2015.

No que se refere aos navios, a Petrobras, em geral, utiliza três tipos de PSV: PSV 1500, PSV 3000 e PSV 4500, cujas características encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Características dos PSVs

	Capacidade do convés (t)	Velocidade média (Km/h)	Largura do convés (m)	Comprimento do convés (m)	Área do convés (m^2)	Custo Fixo (R$)	Custo Variável (R$/Km)
PSV 1500	600	18,52	11,4	31,5	359,10	112000,00	10,20
PSV 1500	500	18,52	10,5	33,5	351,75	112000,00	10,20
PSV 1500	500	18,52	8,5	30,0	255,0	112000,00	10,20
PSV 3000	1200	18,52	13,0	49,0	637,0	130000,00	11,90
PSV 3000	1600	18,52	14,3	48,4	692,12	130000,00	11,90
PSV 3000	1500	18,52	13,5	43,0	580,5	130000,00	11,90
PSV 3000	1500	18,52	13,2	43,0	567,6	130000,00	11,90
PSV 3000	1600	18,52	12,0	47,0	564,0	130000,00	11,90
PSV 4500	1800	18,52	13,8	58,8	811,44	156000,00	13,80
PSV 4500	4000	18,52	13,8	58,8	811,44	156000,00	13,80
PSV 4500	4000	18,52	13,9	54,2	753,38	156000,00	13,80
PSV 4500	4000	18,52	15,8	62,2	982,76	156000,00	13,80
PSV 4500	4000	18,52	16,0	57,0	912,0	156000,00	13,80
PSV 4500	4000	18,52	13,5	51,0	688,5	156000,00	13,80

Fonte: Petrobras (2014)

Nota-se pela Tabela 3 que se adotou um valor padrão para velocidade dos três tipos de PSV, bem como custos fixos e variáveis iguais para cada categoria. Portanto, as principais características que estão variando são a largura e comprimento do convés e a capacidade de cada embarcação.

Considerando que o modelo trata os parâmetros de largura e comprimento tanto de convés de navio quanto de cargas como inteiros, optou-se pelo arredondamento dos valores reais de tais dimensões no momento de cadastrar os dados.

No que tange aos tempos adotados, sabe-se que em uma situação real, o prazo para que um navio possa atender todo o manifesto de carga, em geral, é de, no máximo, três dias. O tempo médio para carregar o navio no porto é $ta_0 = 6h$ e o tempo médio para atender às plataformas é $ta_i = 2{,}5h$, com $i = 1, \dots, np$.

No que se refere às características de largura, comprimento e peso das cargas, conforme mencionado anteriormente, esses dados foram extraídos de alguns manifestos de carga fornecidos. As dimensões de largura e comprimento, que são valores reais, foram convertidos em valores inteiros para criação das instâncias.

3.2.4 Criação de Instâncias

A partir dos dados levantados, construíram-se as instâncias. O primeiro passo foi calcular a distância das plataformas entre elas e em relação à base de apoio considerando as latitudes e longitudes, a fim de estruturar a matriz de distância. Calculou-se a distância em linha reta entre as coordenadas, com base na equação (17).

$$Distância = 6371 \cos^{-1}\left(\cos\left(\pi\frac{(90 - lat_j)}{180}\right)\cos\left((90 - lat_i)\frac{\pi}{180}\right) + \sin\left((90 - lat_j)\frac{\pi}{180}\right)\sin\left((90 - lat_i)\frac{\pi}{180}\right)\cos\left((lon_i - lon_j)\frac{\pi}{180}\right)\right) \quad (17)$$

Em que:

- 6371 representa o raio da Terra em quilômetros;
- lat_i e lat_j são as latitudes das plataformas i e j, respectivamente, expressas em graus;
- lon_i e lon_j são as longitudes das plataformas i e j, respectivamente, expressas em graus.

A matriz de distância obtida para a Bacia do Espírito Santo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Matriz de distâncias da Bacia do ES (Km)

	CPVV	P57	CDAN	CVIT	CDSM	CAPX	MOP1	PPER1	PCA
CPVV	0	105,64	116,14	88,59	81,89	108,55	73,83	140,43	152,91
P57	105,64	0	11,17	143,52	147,78	9,50	47,37	204,82	241,33
CDAN	116,14	11,17	0	154,22	158,73	15,32	54,09	215,42	252,46
CVIT	88,59	143,52	154,22	0	14,17	140,16	139,29	61,47	105,81
CDSM	81,89	147,78	158,73	14,17	0	145,26	138,92	60,72	96,45
CAPX	108,55	9,50	15,32	140,16	145,26	0	55,24	201,13	239,85
MOP1	73,83	47,37	54,09	139,29	138,92	55,24	0	199,48	223,75
PPER1	140,43	204,82	215,42	61,47	60,72	201,13	199,5	0	65,34
PCA	152,91	241,33	252,46	105,81	96,45	239,85	223,75	65,34	0

Analogamente ao que foi feito com os dados da Bacia do ES, com base latitudes e longitudes, calculou-se a matriz de distância para a Bacia de Campos, a qual é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz de distâncias da Bacia de Campos (Km)

(Continua)

Código	TAI	FPBR	FPNT	FPRJ	FPMLS	FPRO	FSME	P-07	P-08	P-09	P-12	P-15	P-18	P-19	P-20	P-25	P-26	P-27	P-31	P-32	P-33	P-35	P-37	P-38	P-40	P-43	P-47	P-48	P-50
TAI	0,00	206,94	188,46	153,66	180,10	125,81	168,60	118,59	129,23	128,90	105,97	123,64	178,60	175,87	172,39	192,84	178,73	166,50	187,42	156,86	178,91	174,56	171,95	170,06	175,40	155,95	161,70	159,89	202,30
FPBR	206,94	0,00	63,75	116,94	70,65	140,59	42,10	127,98	111,28	102,04	137,86	115,82	59,06	56,51	54,90	22,04	63,24	60,09	26,69	63,47	53,17	61,55	67,61	76,18	72,83	82,36	59,77	92,08	16,96
FPNT	188,46	63,75	0,00	59,17	10,01	89,41	43,42	82,13	65,65	61,37	94,98	71,52	12,27	16,92	22,06	43,10	10,10	25,23	40,86	35,44	16,73	15,20	16,52	20,23	14,61	33,69	31,58	36,23	46,98
FPRJ	153,66	116,94	59,17	0,00	49,50	33,59	80,92	35,08	28,23	36,12	48,16	32,16	58,68	60,55	62,13	94,90	55,08	57,52	90,50	58,05	64,07	55,63	49,58	41,32	45,79	35,66	59,84	24,87	101,77
FPMLS	180,10	70,65	10,01	49,50	0,00	79,41	44,45	72,23	55,89	52,15	85,17	61,79	12,61	16,93	21,48	49,14	8,15	22,03	45,99	31,14	18,84	12,61	9,94	10,48	4,83	24,43	28,31	26,22	54,31
FPRO	125,81	140,59	89,41	33,59	79,41	0,00	100,42	17,16	30,16	40,97	22,01	27,34	86,04	86,58	86,62	119,06	83,28	80,84	113,98	77,46	90,35	82,30	76,69	69,70	75,02	59,17	80,85	53,18	127,13
FSME	168,60	42,10	43,42	80,92	44,45	100,42	0,00	86,77	70,50	60,64	96,05	74,62	32,30	27,62	23,00	24,28	36,48	24,68	18,81	23,28	26,74	31,93	36,65	44,61	43,94	45,26	21,10	57,11	33,79
P-07	118,59	127,98	82,13	35,08	72,23	17,16	86,77	0,00	17,08	26,15	13,59	12,17	76,70	76,41	75,60	107,00	74,63	69,47	101,69	64,51	80,18	72,68	67,63	61,90	67,52	49,38	68,42	46,88	115,57
P-08	129,23	111,28	65,65	28,23	55,89	30,16	70,50	17,08	0,00	11,19	29,34	5,97	59,72	59,34	58,52	90,12	57,80	52,42	84,86	47,83	63,10	55,68	50,75	45,45	51,11	32,47	51,57	31,60	98,59
P-09	128,90	102,04	61,37	36,12	52,15	40,97	60,64	26,15	11,19	0,00	36,15	14,05	53,75	52,59	51,00	81,36	52,55	44,70	75,96	38,70	56,26	49,59	45,42	41,77	47,34	27,74	42,86	31,35	90,15
P-12	105,97	137,86	94,98	48,16	85,17	22,01	96,05	13,59	29,34	36,15	0,00	23,57	88,88	88,23	86,98	117,44	87,10	80,73	112,00	74,76	91,96	84,79	80,02	74,76	80,41	61,75	78,99	60,21	126,28
P-15	123,64	115,82	71,52	32,16	61,79	27,34	74,62	12,17	5,97	14,05	23,57	0,00	65,33	64,77	63,74	94,90	63,53	57,55	89,57	52,36	68,52	61,25	56,45	51,33	57,00	38,18	56,32	37,56	103,52
P-18	178,60	59,06	12,27	58,68	12,61	86,04	32,30	76,70	59,72	53,75	88,88	65,33	0,00	4,80	9,91	37,21	4,47	13,18	33,68	23,52	6,26	4,18	9,36	17,38	13,81	27,33	19,43	34,01	43,24
P-19	175,87	56,51	16,92	60,55	16,93	86,58	27,62	76,41	59,34	52,59	88,23	64,77	4,80	0,00	5,14	34,49	8,86	9,47	30,50	19,71	3,78	5,12	11,12	19,75	17,25	27,43	15,29	35,69	41,28
P-20	172,39	54,90	22,06	62,13	21,48	86,62	23,00	75,60	58,52	51,00	86,98	63,74	9,91	5,14	0,00	32,91	13,67	6,33	28,37	15,61	6,71	8,93	14,04	22,51	21,06	27,64	10,88	37,33	40,53
P-25	192,84	22,04	43,10	94,90	49,14	119,06	24,28	107,00	90,12	81,36	117,44	94,90	37,21	34,49	32,91	0,00	41,49	38,29	5,61	42,68	31,22	39,55	45,61	54,20	51,02	60,47	38,59	70,04	9,51
P-26	178,73	63,24	10,10	55,08	8,15	83,28	36,48	74,63	57,80	52,55	87,10	63,53	4,47	8,86	13,67	41,49	0,00	15,52	38,08	25,52	10,73	5,36	7,14	13,84	9,61	25,35	21,94	30,67	47,22
P-27	166,50	60,09	25,23	57,52	22,03	80,84	24,68	69,47	52,42	44,70	80,73	57,55	13,18	9,47	6,33	38,29	15,52	0,00	33,41	10,35	12,44	10,16	12,71	20,03	20,21	22,29	6,43	33,02	46,32
P-31	187,42	26,69	40,86	90,50	45,99	113,98	18,81	101,69	84,86	75,96	112,00	89,57	33,68	30,50	28,37	5,61	38,08	33,41	0,00	37,26	27,50	35,61	41,59	50,23	47,45	55,69	33,29	65,68	15,09
P-32	156,86	63,47	35,44	58,05	31,14	77,46	23,28	64,51	47,83	38,70	74,76	52,36	23,52	19,71	15,61	42,68	25,52	10,35	37,26	0,00	22,27	20,25	21,24	26,44	28,36	22,70	4,87	35,18	51,58
P-33	178,91	53,17	16,73	64,07	18,84	90,35	26,74	80,18	63,10	56,26	91,96	68,52	6,26	3,78	6,71	31,22	10,73	12,44	27,50	22,27	0,00	8,44	14,50	23,02	19,95	31,20	17,59	39,24	37,71
P-35	174,56	61,55	15,20	55,63	12,61	82,30	31,93	72,68	55,68	49,59	84,79	61,25	4,18	5,12	8,93	39,55	5,36	10,16	35,61	20,25	8,44	0,00	6,07	14,65	12,27	23,37	16,58	30,81	46,14
P-37	171,95	67,61	16,52	49,58	9,94	76,69	36,65	67,63	50,75	45,42	80,02	56,45	9,36	11,12	14,04	45,61	7,14	12,71	41,59	21,24	14,50	6,07	0,00	8,64	7,51	18,28	18,71	24,79	52,19
P-38	170,06	76,18	20,23	41,32	10,48	69,70	44,61	61,90	45,45	41,77	74,76	51,33	17,38	19,75	22,51	54,20	13,84	20,03	50,23	26,44	23,02	14,65	8,64	0,00	5,67	14,13	25,17	16,83	60,59
P-40	175,40	72,83	14,61	45,79	4,83	75,02	43,94	67,52	51,11	47,34	80,41	57,00	13,81	17,25	21,06	51,02	9,61	20,21	47,45	28,36	19,95	12,27	7,51	5,67	0,00	19,62	26,14	21,90	56,83
P-43	155,95	82,36	33,69	35,66	24,43	59,17	45,26	49,38	32,47	27,74	61,75	38,18	27,33	27,43	27,64	60,47	25,35	22,29	55,69	22,70	31,20	23,37	18,28	14,13	19,62	0,00	24,18	12,72	68,15
P-47	161,70	59,77	31,58	59,84	28,31	80,85	21,10	68,42	51,57	42,86	78,99	56,32	19,43	15,29	10,88	38,59	21,94	6,43	33,29	4,87	17,59	16,58	18,71	25,17	26,14	24,18	0,00	36,09	47,29
P-48	159,89	92,08	36,23	24,87	26,22	53,18	57,11	46,88	31,60	31,35	60,21	37,56	34,01	35,69	37,33	70,04	30,67	33,02	65,68	35,18	39,24	30,81	24,79	16,83	21,90	12,72	36,09	0,00	76,94
P-50	202,30	16,96	46,98	101,77	54,31	127,13	33,79	115,57	98,59	90,15	126,28	103,52	43,24	41,28	40,53	9,51	47,22	46,32	15,09	51,58	37,71	46,14	52,19	60,59	56,83	68,15	47,29	76,94	0,00

Tabela 5 - Matriz de distâncias da Bacia de Campos (Km)

(Continuação)

Código	P-51	P-52	P-53	P-54	P-55	P-56	P-57	P-58	P-61	P-62	P-63	SS-06	PCP-1	PCP-2	PCP-3	PCH-1	PCH-2	PCE-1	PGP-1	PNA-1	PNA-2	PPM-1	PPG-1A	PPG-1B	PRA-1	PVW-1	PVM-2	PVM-3
TAI	173,94	215,45	186,06	205,06	213,17	184,35	218,30	224,14	145,16	209,25	144,80	117,18	136,91	139,91	136,98	132,19	133,57	116,04	138,60	137,96	139,33	112,94	148,35	148,41	170,93	154,99	153,43	152,00
FPBR	82,83	8,52	56,35	3,81	10,35	78,63	80,38	82,06	217,30	2,64	217,33	122,96	73,26	70,14	73,20	88,04	89,48	124,63	78,94	84,05	83,99	136,67	63,86	63,83	41,00	53,92	55,85	57,68
FPNT	22,23	68,28	8,34	59,95	59,50	15,07	139,80	142,58	161,50	63,64	161,59	79,42	59,25	57,39	59,20	56,44	54,88	81,08	51,37	50,65	49,19	91,07	48,67	48,59	40,85	51,48	51,23	51,01
FPRJ	36,95	123,23	63,56	113,22	115,36	46,05	182,45	186,42	102,38	117,60	102,46	37,00	68,82	69,80	68,83	49,00	45,14	37,92	54,19	47,24	45,73	41,70	67,18	67,15	80,21	78,11	76,35	74,66
FPMLS	12,74	75,88	14,56	66,84	67,39	9,70	144,25	147,34	151,88	70,82	151,96	69,67	54,51	53,08	54,46	48,74	46,78	71,32	44,78	43,02	41,41	81,15	44,96	44,89	42,30	49,98	49,33	48,73
FPRO	67,81	147,80	92,17	137,10	140,85	77,94	196,90	201,50	77,41	141,70	77,39	23,59	78,30	80,44	78,34	57,33	54,38	22,75	65,80	59,07	58,47	15,12	81,63	81,62	100,61	93,42	91,38	89,41
FSME	53,15	50,26	35,45	39,17	45,72	54,14	102,20	105,87	177,75	43,81	177,75	81,45	32,13	29,02	32,06	46,03	47,70	83,09	36,90	42,36	42,49	95,25	21,85	21,81	3,00	13,75	15,18	16,63
P-07	62,13	135,56	83,47	124,64	129,18	72,82	180,93	185,64	92,58	129,30	92,52	6,47	62,34	64,68	62,38	41,91	39,42	5,62	50,80	44,54	44,28	9,03	66,82	66,82	87,30	78,55	76,47	74,48
P-08	46,65	118,74	66,60	107,88	112,22	57,41	167,07	171,58	107,55	112,53	107,53	13,78	48,75	50,69	48,78	27,54	24,36	15,43	35,71	28,91	28,32	26,09	51,47	51,46	70,84	63,27	61,23	59,27
P-09	45,04	109,74	61,00	98,76	103,64	55,51	156,01	160,56	118,18	103,43	118,14	20,92	37,58	39,57	37,61	16,40	13,43	22,60	24,87	18,39	18,14	34,65	40,82	40,81	61,22	52,60	50,53	48,55
P-12	75,45	145,68	95,86	134,66	139,74	86,17	186,37	191,30	87,80	139,33	87,69	15,69	68,91	71,59	68,96	50,12	48,39	13,99	59,27	53,81	53,93	7,19	75,12	75,13	96,89	86,57	84,47	82,47
P-15	52,62	123,42	72,29	112,49	117,10	63,37	169,60	174,23	104,23	117,15	104,19	7,91	50,98	53,16	51,01	30,13	27,43	9,59	38,86	32,45	32,14	20,92	54,84	54,84	75,13	66,61	64,54	62,55
P-18	23,86	64,82	7,47	55,27	56,72	22,10	131,66	134,77	160,61	59,44	160,68	73,20	47,25	45,29	47,19	46,45	45,43	74,90	40,42	40,71	39,46	85,72	36,47	36,40	29,98	39,36	39,03	38,77
P-19	27,17	62,69	10,78	52,76	54,94	26,57	127,67	130,89	161,93	57,08	161,98	72,57	43,18	41,08	43,12	43,99	43,33	74,28	37,34	38,35	37,26	85,42	32,15	32,07	25,40	34,59	34,31	34,10
P-20	30,62	61,55	15,54	51,23	54,27	31,18	124,02	127,38	162,67	55,69	162,70	71,41	38,55	36,34	38,49	41,07	40,80	73,12	33,81	35,60	34,70	84,57	27,32	27,24	21,00	29,45	29,17	28,99
P-25	61,06	28,75	35,23	18,33	22,32	57,58	97,22	99,74	195,50	22,78	195,53	102,25	56,37	53,27	56,29	68,32	69,32	103,94	59,45	63,85	63,56	115,82	45,64	45,59	22,19	37,85	39,41	40,91
P-26	19,60	68,82	8,91	59,44	60,58	17,73	136,13	139,24	157,25	63,55	157,32	71,43	49,32	47,57	49,27	46,59	45,21	73,12	41,29	40,80	39,40	83,64	39,00	38,92	34,25	42,83	42,35	41,94
P-27	28,71	67,03	20,15	56,50	60,03	31,46	126,77	130,35	157,23	61,04	157,26	65,19	34,08	32,17	34,02	34,87	34,51	66,90	27,92	29,35	28,41	78,42	23,49	23,41	23,31	28,03	27,31	26,70
P-31	57,49	33,89	32,69	23,13	27,85	54,83	98,94	101,74	190,62	27,72	190,64	96,87	50,82	47,74	50,75	62,76	63,81	98,55	53,87	58,34	58,09	110,47	40,04	39,99	16,62	32,48	33,98	35,44
P-32	35,16	71,07	30,46	60,13	64,98	40,02	124,44	128,37	154,66	64,79	154,66	59,61	23,82	22,07	23,76	26,39	26,85	61,29	18,43	21,40	20,95	73,24	13,86	13,79	23,19	21,28	19,98	18,83
P-33	29,98	59,19	9,25	49,40	51,33	28,23	125,41	128,52	165,60	53,66	165,65	76,31	45,23	42,96	45,17	47,27	46,75	78,02	40,31	41,69	40,66	89,19	33,91	33,83	24,26	35,12	35,06	35,06
P-35	22,10	67,62	11,61	57,79	59,75	22,30	132,62	135,89	157,25	62,08	157,31	69,11	44,07	42,26	44,01	42,38	41,29	70,81	36,57	36,62	35,34	81,71	33,65	33,57	29,90	37,60	37,07	36,62
P-37	16,59	73,69	15,85	63,85	65,78	18,90	138,06	141,42	151,32	68,14	151,38	64,34	44,58	43,14	44,53	39,95	38,37	66,04	35,26	34,16	32,68	76,65	35,09	35,02	34,87	40,70	39,90	39,17
P-38	8,80	82,14	22,59	72,41	74,10	15,30	146,42	149,84	143,41	76,67	143,48	59,22	48,13	47,19	48,09	39,51	37,19	60,88	36,73	33,94	32,21	70,85	40,03	39,96	43,03	47,21	46,16	45,17
P-40	10,04	78,43	17,77	69,03	70,15	11,68	144,89	148,14	148,11	73,16	148,19	64,88	51,20	49,96	51,15	44,30	42,21	66,54	40,77	38,62	36,97	76,45	42,21	42,13	42,04	48,18	47,35	46,58
P-43	19,23	89,17	34,13	78,73	81,88	28,74	147,07	150,93	135,04	83,25	135,08	46,08	39,06	38,92	39,04	26,38	23,63	47,77	25,62	21,22	19,37	58,41	33,79	33,74	44,55	43,58	42,04	40,57
P-47	33,97	67,17	26,07	56,34	60,81	37,60	123,13	126,90	157,83	60,97	157,84	63,70	27,89	25,86	27,83	31,15	31,42	65,39	23,30	26,02	25,43	77,23	17,09	17,01	20,43	22,11	21,21	20,46
P-48	15,24	98,38	39,41	88,36	90,56	25,96	159,22	162,97	126,62	92,72	126,68	45,18	51,21	51,30	51,20	35,83	32,39	46,74	37,15	31,61	29,74	55,61	46,50	46,45	56,12	56,24	54,73	53,28
P-50	66,73	21,60	39,84	13,25	13,73	61,96	96,41	98,40	203,11	16,66	203,15	110,97	65,88	62,78	65,81	77,50	78,36	112,67	68,72	72,89	72,53	124,44	55,12	55,07	31,70	47,31	48,90	50,42

Tabela 5 - Matriz de distâncias da Bacia de Campos (Km)

(Conclusão)

Código	TAI	P-51	P-52	P-53	P-54	P-55	P-56	P-57	P-58	P-61	P-62	P-63	SS-06	PCP-1	PCP-2	PCP-3	PCH-1	PCH-2	PCE-1	PGP-1	PNA-1	PNA-2	PPM-1	PPG-1A	PPG-1B	PRA-1	PVW-1	PVM-2	PVM-3
TAI	0,00	173,94	215,45	186,06	205,06	213,17	184,35	218,30	224,14	145,16	209,25	144,80	117,18	136,91	139,91	136,98	132,19	133,57	116,04	138,60	137,96	139,33	112,94	148,35	148,41	170,93	154,99	153,43	152,00
P-51	173,94	0,00	88,33	27,23	79,03	79,96	10,76	154,63	157,95	139,28	83,13	139,37	60,33	56,24	55,48	56,21	45,61	42,83	61,90	44,04	40,35	38,52	70,84	48,62	48,56	51,44	56,01	54,94	53,94
P-52	215,45	88,33	0,00	61,37	11,09	9,22	83,33	80,74	81,82	224,21	6,45	224,24	130,66	81,66	78,53	81,59	96,03	97,34	132,33	86,97	91,90	91,76	144,31	72,08	72,04	48,99	62,33	64,24	66,05
P-53	186,06	27,23	61,37	0,00	52,54	52,84	22,36	131,60	134,43	165,86	56,42	165,93	80,18	53,95	51,82	53,89	53,92	52,90	81,88	47,77	48,18	46,93	92,49	42,84	42,76	32,79	44,36	44,31	44,29
P-54	205,06	79,03	11,09	52,54	0,00	9,45	74,82	83,61	85,42	213,72	4,67	213,75	119,68	70,68	67,55	70,61	84,95	86,30	121,36	75,89	80,86	80,75	133,36	61,00	60,97	37,91	51,38	53,26	55,05
P-55	213,17	79,96	9,22	52,84	9,45	0,00	74,57	89,23	90,54	216,82	8,04	216,86	124,50	77,75	74,62	77,68	90,61	91,64	126,20	81,70	86,17	85,88	138,02	67,49	67,45	44,02	58,66	60,43	62,11
P-56	184,35	10,76	83,33	22,36	74,82	74,57	0,00	153,48	156,47	147,82	78,60	147,93	71,08	62,83	61,63	62,79	54,72	52,26	72,66	51,97	49,20	47,45	81,48	53,87	53,80	51,97	59,48	58,75	58,06
P-57	218,30	154,63	80,74	131,60	83,61	89,23	153,48	0,00	5,86	273,43	81,80	273,36	174,69	118,64	116,46	118,60	139,61	142,71	176,05	131,45	138,46	139,38	188,00	116,23	116,25	103,47	104,71	106,61	108,45
P-58	224,14	157,95	81,82	134,43	85,42	90,54	156,47	5,86	0,00	278,19	83,33	278,12	179,44	123,31	121,07	123,27	144,18	147,23	180,82	135,91	142,88	143,76	192,81	120,54	120,56	107,03	108,94	110,87	112,74
P-61	145,16	139,28	224,21	165,86	213,72	216,82	147,82	273,43	278,19	0,00	218,26	0,41	98,75	154,92	157,26	154,96	134,36	131,61	97,38	143,05	136,42	135,87	85,48	158,96	158,96	177,84	170,76	168,70	166,72
P-62	209,25	83,13	6,45	56,42	4,67	8,04	78,60	81,80	83,33	218,26	0,00	218,29	124,35	75,22	72,09	75,15	89,62	90,98	126,02	80,55	85,53	85,42	138,02	65,63	65,60	42,58	55,90	57,80	59,60
P-63	144,80	139,37	224,24	165,93	213,75	216,86	147,93	273,36	278,12	0,41	218,29	0,00	98,68	154,86	157,21	154,90	134,31	131,57	97,31	143,01	136,39	135,85	85,40	158,93	158,93	177,85	170,72	168,66	166,69
SS-06	117,18	60,33	130,66	80,18	119,68	124,50	71,08	174,69	179,44	98,75	124,35	98,68	0,00	56,19	58,61	56,24	36,07	33,84	1,71	45,10	39,10	39,01	13,82	61,11	61,12	82,11	72,78	70,69	68,70
PCP-1	136,91	56,24	81,66	53,95	70,68	77,75	62,83	118,64	123,31	154,92	75,22	154,86	56,19	0,00	3,14	0,07	21,24	24,71	57,62	14,66	21,61	23,09	69,73	11,70	11,77	34,21	19,35	17,42	15,65
PCP-2	139,91	55,48	78,53	51,82	67,55	74,62	61,63	116,46	121,07	157,26	72,09	157,21	58,61	3,14	0,00	3,07	23,16	26,42	60,06	15,70	22,82	24,15	72,22	9,11	9,18	31,13	16,22	14,29	12,52
PCP-3	136,98	56,21	81,59	53,89	70,61	77,68	62,79	118,60	123,27	154,96	75,15	154,90	56,24	0,07	3,07	0,00	21,27	24,73	57,66	14,66	21,61	23,10	69,78	11,63	11,70	34,14	19,28	17,35	15,58
PCH-1	132,19	45,61	96,03	53,92	84,95	90,61	54,72	139,61	144,18	134,36	89,62	134,31	36,07	21,24	23,16	21,27	0,00	3,87	37,63	9,16	5,79	7,33	49,87	25,08	25,09	47,05	36,71	34,62	32,62
PCH-2	133,57	42,83	97,34	52,90	86,30	91,64	52,26	142,71	147,23	131,61	90,98	131,57	33,84	24,71	26,42	24,73	3,87	0,00	35,45	11,44	5,47	6,10	47,66	27,41	27,41	48,50	39,18	37,11	35,13
PCE-1	116,04	61,90	132,33	81,88	121,36	126,20	72,66	176,05	180,82	97,38	126,02	97,31	1,71	57,62	60,06	57,66	37,63	35,45	0,00	46,67	40,73	40,66	12,24	62,68	62,69	83,76	74,33	72,24	70,24
PGP-1	138,60	44,04	86,97	47,77	75,89	81,70	51,97	131,45	135,91	143,05	80,55	143,01	45,10	14,66	15,70	14,66	9,16	11,44	46,67	0,00	7,14	8,47	58,91	16,02	16,03	37,98	27,76	25,68	23,70
PNA-1	137,96	40,35	91,90	48,18	80,86	86,17	49,20	138,46	142,88	136,42	85,53	136,39	39,10	21,61	22,82	21,61	5,79	5,47	40,73	7,14	0,00	1,88	52,91	22,56	22,56	43,09	34,36	32,32	30,36
PNA-2	139,33	38,52	91,76	46,93	80,75	85,88	47,45	139,38	143,76	135,87	85,42	135,85	39,01	23,09	24,15	23,10	7,33	6,10	40,66	8,47	1,88	0,00	52,77	23,28	23,26	43,10	35,04	33,03	31,10
PPM-1	112,94	70,84	144,31	92,49	133,36	138,02	81,48	188,00	192,81	85,48	138,02	85,40	13,82	69,73	72,22	69,78	49,87	47,66	12,24	58,91	52,91	52,77	0,00	74,92	74,93	95,87	86,58	84,48	82,48
PPG-1A	148,35	48,62	72,08	42,84	61,00	67,49	53,87	116,23	120,54	158,96	65,63	158,93	61,11	11,70	9,11	11,63	25,08	27,41	62,68	16,02	22,56	23,28	74,92	0,00	0,08	23,50	11,80	9,76	7,82
PPG-1B	148,41	48,56	72,04	42,76	60,97	67,45	53,80	116,25	120,56	158,96	65,60	158,93	61,12	11,77	9,18	11,70	25,09	27,41	62,69	16,03	22,56	23,26	74,93	0,08	0,00	23,45	11,80	9,77	7,84
PRA-1	170,93	51,44	48,99	32,79	37,91	44,02	51,97	103,47	107,03	177,84	42,58	177,85	82,11	34,21	31,13	34,14	47,05	48,50	83,76	37,98	43,09	43,10	95,87	23,50	23,45	0,00	16,39	17,65	18,95
PVM-1	154,99	56,01	62,33	44,36	51,38	58,66	59,48	104,71	108,94	170,76	55,90	170,72	72,78	19,35	16,22	19,28	36,71	39,18	74,33	27,76	34,36	35,04	86,58	11,80	11,80	16,39	0,00	2,10	4,10
PVM-2	153,43	54,94	64,24	44,31	53,26	60,43	58,75	106,61	110,87	168,70	57,80	168,66	70,69	17,42	14,29	17,35	34,62	37,11	72,24	25,68	32,32	33,03	84,48	9,76	9,77	17,65	2,10	0,00	2,00
PVM-3	152,00	53,94	66,05	44,29	55,05	62,11	58,06	108,45	112,74	166,72	59,60	166,69	68,70	15,65	12,52	15,58	32,62	35,13	70,24	23,70	30,36	31,10	82,48	7,82	7,84	18,95	4,10	2,00	0,00

A segunda etapa consistiu na organização dos dados das embarcações, os quais foram apresentados na Tabela 3 da seção anterior. Observa-se que há tipos distintos de PSV dentro da mesma categoria, ou seja, existem três tipos de PSV 1500, cinco tipos de PSV 3000 e seis tipos de PSV 4500. Para constituir a instância, a composição a frota disponível no porto foi a seguinte: no caso de instâncias reais, colocaram-se os mesmos navios usados nas rotas; para instâncias de teste, escolheram-se os navios aleatoriamente.

O terceiro passo foi calcular a matriz de tempo, a qual foi obtida dividindo-se a matriz de distância pela velocidade média dos PSV (18,52 Km/h). A próxima etapa foi organizar os outros dados relativos aos tempos. O tempo médio para carregar o navio no porto e o tempo médio para atender às plataformas, cujos valores foram apresentados na seção anterior e foram considerados iguais para todas as instâncias. Criou-se um conjunto de instâncias em que $TL_k = 72h(\forall k)$ e outro que utiliza $TL_k = 48h(\forall k)$.

Em seguida, os dados referentes às cargas foram preparados a partir dos manifestos de carga. A Tabela 6 apresenta as dimensões e pesos de algumas cargas utilizadas nas instâncias criadas.

Tabela 6 - Atributos das cargas

Nº	**l(m)**	**c(m)**	**Peso (t)**	**Nº**	**l(m)**	**c(m)**	**Peso (t)**	**Nº**	**l(m)**	**c(m)**	**Peso (t)**	**Nº**	**l(m)**	**c(m)**	**Peso (t)**
1	2	15	34,711	**21**	1	2	0,214	**41**	1	7	0,723	**61**	1	8	3,325
2	6	6	12,845	**22**	3	3	2,500	**42**	6	2	7,474	**62**	8	3	10,412
3	1	5	2,697	**23**	2	7	1,650	**43**	4	6	5,100	**63**	3	3	1,767
4	3	6	10,180	**24**	2	6	6,080	**44**	4	9	23,619	**64**	3	4	3,500
5	3	12	9,210	**25**	4	7	12,000	**45**	4	3	7,017	**65**	6	6	28,883
6	3	3	1,640	**26**	6	4	12,613	**46**	2	10	11,300	**66**	3	7	9,287
7	8	6	15,765	**27**	10	6	34,732	**47**	3	2	5,959	**67**	2	3	3,240
8	2	3	2,803	**28**	3	6	2,529	**48**	2	12	17,120	**68**	1	1	0,540
9	5	2	5,665	**29**	3	6	1,848	**49**	2	20	40,398	**69**	8	3	23,098
10	2	7	5,400	**30**	2	2	0,470	**50**	4	5	22,000	**70**	3	6	12,451
11	3	3	2,305	**31**	2	6	8,600	**51**	6	14	48,476	**71**	1	2	0,090
12	1	1	0,080	**32**	6	6	10,000	**52**	4	11	40,704	**72**	2	7	8,821
13	3	3	2,601	**33**	1	1	0,102	**53**	3	9	9,150	**73**	3	3	5,000
14	11	2	20,606	**34**	3	2	5,965	**54**	2	3	1,380	**74**	6	15	36,358
15	10	6	49,031	**35**	10	6	40,890	**55**	14	3	24,705	**75**	8	2	9,432
16	3	21	17,249	**36**	14	2	11,373	**56**	11	2	13,820	**76**	3	16	19,570
17	1	1	2,225	**37**	1	11	5,653	**57**	3	6	13,200	**77**	6	6	27,078
18	8	4	15,104	**38**	2	16	15,986	**58**	6	9	30,294	**78**	2	5	9,696
19	8	12	60,218	**39**	2	2	2,551	**59**	3	6	10,905	**79**	3	15	22,094
20	2	8	8,685	**40**	8	8	21,500	**60**	4	6	14,298	**80**	11	3	21,095

Nas instâncias criadas, optou-se pela não clusterização de cargas das plataformas, ou seja, não foi feito um agrupamento prévio das cargas demandadas por plataforma antes de se executar o modelo. Dessa forma, o que se testa é a capacidade do modelo em termos da quantidade máxima de cargas de diferentes formatos por plataforma que ele consegue arrumar. Essa estratégia é caracterizada pela elevada complexidade de resolução, que se deve, sobretudo, à variedade de dimensões e quantidade de cargas e resulta em uma arrumação dispersa do conjunto de cargas solicitado pela mesma plataforma. Ou seja, as cargas de uma plataforma não estarão agrupadas em uma área do convés. Nas instâncias elaboradas, as cargas demandadas por plataforma variaram de uma até, no máximo, oito.

Por fim, criou-se o conjunto de instâncias que se diferenciam pela quantidade de plataformas, de dias ou de cargas totais. A nomenclatura usada é do tipo "$PKDA_n$_B", em que P é a quantidade de plataformas; K é o número de navios disponibilizados; D é o prazo em dias de limite da rota; A_n é se a instância é real, "R_n", ou instância de teste "T_n", em que n=1, 2..., n e denota diferenças em instâncias com a mesma caraterísticas, por exemplo, número de cargas; e B indica a qual Bacia os dados fazem referência: Bacia do Espírito Santo , denotada por "E", ou Bacia de Campos, indicada por "C". A principal diferença entre as instâncias do tipo "R" e "T" é que a primeira se baseia em manifestos de cargas reais, e usam as demandas, dimensões e rotas reais, enquanto as de teste foram criadas para testar a capacidade de resolução do modelo, adotando-se, para isso, áreas e pesos de cargas próximos aos limites de capacidade dos navios de forma a forçar o uso de uma quantidade de navios maior que dois. Apenas as instâncias do tipo "R" permitem comparação com a situação real em termos de distância navegada.

A Tabela 7 apresenta os valores que podem ser assumidos por cada um desses critérios presentes na nomenclatura das instâncias.

Tabela 7 - Valores possíveis para os critérios na construção das instâncias

Critérios	Valores
P	4 a 15
K	2 a 5
D	2 ou 3

Estabeleceu-se um tempo limite para execução do modelo de 4 horas usando um computador *Intel i7* com 16 GB de memória RAM.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo proposto trata de um problema de roteamento de frota heterogênea de navios com carregamento bidimensional e equilíbrio de peso entre os bordos da embarcação que foi denominado nesta dissertação como *Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (WB2L-HFVRP), que consiste em uma nova contribuição para o estudo desse problema, já que até então nenhum trabalho incorporou frota heterogênea e equilíbrio náutico de embarcações em um mesmo modelo.

O WB2L-HFVRP visa criar para cada navio uma rota e sua respectiva arrumação da carga no convés para atender a várias plataformas. As cargas não podem ser empilhadas, sendo posicionadas no piso do convés, portanto, é uma arrumação bidimensional. Cada plataforma pode ser atendida por um único navio, para o qual existe um tempo limite máximo de viagem. O problema é classificado como orientado e irrestrito do 2L-CVRP, pois as cargas não poderão ser rotacionadas e serão retiradas dos navios pela parte superior via guindastes, sendo desnecessárias restrições de sequenciamento.

Define-se o WB2L-HFVRP como um grafo não orientado completo $G = (NT, A)$, em que $NT = \{0, 1, \dots, np + 1\}$ é o conjunto de nós que correspondem ao porto no início da rota ($nó$ 0), às plataformas de petróleo ($nós$ $1,2, \dots, np$), no qual np é o número de plataformas, e ao nó virtual $(np + 1)$, que corresponde ao porto ao final da rota, e $A = \{a_{ij} | i, j \in N\}$ é o conjunto de arcos, que liga uma plataforma i a uma plataforma j. Seja N o conjunto de plataformas $(1 \dots np)$, $N0 = \{0\} \cup N$ e $N1 = N \cup \{np + 1\}$; K o conjunto de navios disponíveis no porto $(1, \dots, k)$, em que k é o número de navios da frota; P^i o conjunto de cargas demandadas por uma plataforma $i \in N$.

Cada navio $k \in K$ tem os seguintes parâmetros associados:

L_k : Largura do convés de carga em metros (m);

C_k : Comprimento do convés de carga em metros (m);

Q_k : Capacidade máxima do convés de carga em toneladas (t);

CF_k: Custo fixo em reais (R$);

CV_k: Custo variável em reais por Km (R$/Km);

TL_k : Tempo limite de operação em horas (h).

Cada carga $e \in P^i$ está relacionada com os seguintes parâmetros definidos em $i \in N, e \in P^i$:

l_{ie} : Largura da carga e solicitada pela plataforma i em metros (m);

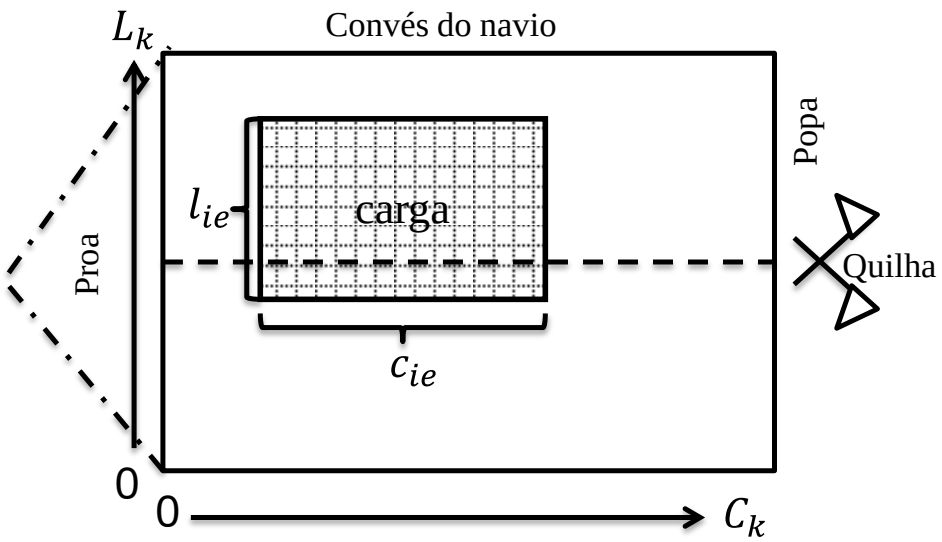
c_{ie} : Comprimento da carga e solicitada pela plataforma i em metros (m);

q_{ie} : Peso da carga e solicitada pela plataforma i em toneladas (t).

A plataforma $i \in NT$ tem como parâmetros a distância em quilômetros entre ela e as outras plataformas, $d_{ij}(d_{ii} = 0)$, o tempo em horas para percorrer a distância d_{ij}, t_{ij}, e o tempo de atendimento a um navio, ta_i. Para restrições com ativação utilizou-se o parâmetro M, que denota um valor para lógica muito grande. Para conferir maior peso à parcela referente ao momento na função objetivo, usou-se o parâmetro de calibração μ.

No WB2L-HFVRP, considera-se um diagrama comprimento-largura, equivalente ao primeiro quadrante do plano cartesiano, em que o eixo horizontal e o eixo vertical representam o comprimento e a largura do convés de um navio, respectivamente, e o canto inferior esquerdo corresponde à coordenada (0,0). As cargas devem ser analisadas em um plano bidimensional, ou seja, são consideradas áreas retangulares ($U_e = c_{ie}\, l_{ie}$). A Figura 25 mostra uma representação do convés do navio contendo uma carga, demonstrando suas respectivas dimensões e posicionamento em relação ao primeiro quadrante do plano cartesiano. Destaca-se o eixo da quilha do navio na Figura 25, pois é em relação a este eixo, que deverá ser calculado o equilíbrio de carga.

Figura 25 - Representação esquemática da superfície de carregamento no navio



No WB2L-HFVRP, um carregamento viável deve satisfazer as seguintes restrições:

1) Todos as cargas de uma plataforma devem ser transportadas por um mesmo navio e entregas fracionadas não são permitidas;

2) Todos os itens devem ter orientação fixa, ou seja, não é possível rotacioná-los, e devem ser carregados com seus lados paralelos aos lados da superfície de carregamento;

3) Cada navio começa e termina sua viagem no porto;

4) Cada plataforma deve ser visitada apenas uma única vez;

5) A capacidade de peso, comprimento e largura de cada navio não devem ser excedidos;

6) Dois itens não podem ser sobrepostos em um navio.

No que se refere às variáveis de decisão, há três categorias*: 1) variáveis de carregamento, 2) variáveis de roteamento* e *3) variável para equilíbrio de peso*, as quais são detalhadas a seguir.

1) Variáveis de Carregamento

Nesta categoria existem duas classes: a) variáveis indicando a posição das cargas e b) variáveis indicando a posição relativa das áreas retangulares das cargas no diagrama comprimento-largura, descritas a seguir.

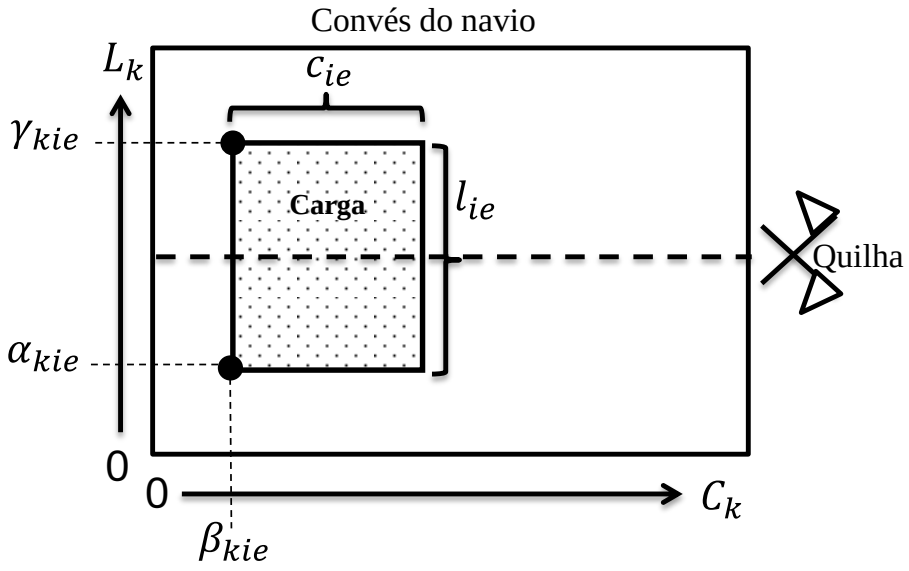
a) Variáveis indicando a posição das cargas

Nesta classe, há três variáveis inteiras positivas definidas em $k \in K, i \in N, e \in P^i$:

- α_{kie}: designa a posição inicial de colocação da carga e da plataforma i em relação ao eixo da largura (y) do navio k;
- β_{kie} : indica a posição inicial de colocação da carga e da plataforma i em relação ao eixo de comprimento (x) do navio k;
- γ_{kie} : determina a posição final de colocação da carga e da plataforma i em relação ao eixo da largura (y) do navio k.

Para exemplificar, a Figura 26 ilustra as variáveis citadas anteriormente de posição em relação ao convés do navio.

Figura 26 - Representação gráfica das variáveis de posição das cargas



b) Variáveis indicando a posição relativa das áreas retangulares das cargas no diagrama comprimento-largura:

Nesta classe há duas variáveis binárias:

- σ_{kiejf}: assume valor 1, se a área retangular da carga e está completamente abaixo da área retangular da carga f e as duas áreas retangulares não estão sobrepostas,$\forall\ k\ \in K, i, j\ \in N$, $e \in P^i, f \in P^j$ e 0 caso contrário;
- δ_{kiejf} : assume valor 1, se a área retangular da carga e está completamente à esquerda da área retangular da carga f e as duas áreas retangulares não estão sobrepostas,$\forall\ k\ \in K, i, j\ \in N,\ e \in P^i, f \in P^j$, e 0 caso contrário.

2) Variáveis de roteamento

Nesta categoria têm-se duas variáveis binárias:

- x_{kij}: assume valor 1, se o navio k viaja diretamente da plataforma i para a plataforma j, $\forall\ k\ \in K, i, j\ \in NT$, e 0 caso contrário;
- y_{ki} : assume valor 1, se o navio k atende a plataforma i , $\forall\ k\ \in K, i\ \in N0$, e 0 caso contrário.

3) Variáveis relativas ao peso

Nesta categoria há duas classes: a) variável para equilíbrio de peso e b) variável para indicar peso transportado, as quais serão detalhadas na sequencia.

a) Variável para equilíbrio de peso:

- w_k: designa o momento do navio k, $k \in K$.

b) Variável para indicar peso transportado:

- qt_{ki}: indica o peso transportado pelo navio $k \in K$ quando ele chega à plataforma $i \in N$.

A formulação matemática para o WB2L-HFVRP é definida como:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in NT} \sum_{j \in NT} CV_k d_{ij} x_{kij} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} CF_k x_{k0j} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} \beta_{kie} + \mu \sum_{k \in K} w_k \quad (18)$$

S.A.

$$y_{ki} = \sum_{j \in N1} x_{kij} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N0, i \neq j \quad (19)$$

$$\alpha_{kjf} - \alpha_{kie} - l_{ie} - \left(\left(\sigma_{kiejf} - 1\right) L_k\right) + \left(\left(2 - y_{ki} - y_{kj}\right) M\right) \geq 0$$
$$\forall\, k \in K, \forall\, i,j \in N, \forall\, e \in P^i, \forall\, f \in P^j, i \neq j \quad (20)$$

$$\beta_{kjf} - \beta_{kie} - c_{ie} - \left(\left(\delta_{kiejf} - 1\right) C_k\right) + \left(\left(2 - y_{ki} - y_{kj}\right) M\right) \geq 0$$
$$\forall\, k \in K, \forall\, i,j \in N, \forall\, e \in P^i, \forall\, f \in P^j, i \neq j \quad (21)$$

$$\left(\sigma_{kiejf} + \sigma_{kjfie} + \delta_{kiejf} + \delta_{kjfie}\right) + \left(\left(2 - y_{ki} - y_{kj}\right) M\right) \geq 1$$
$$\forall\, k \in K, \forall\, i,j \in N, \forall\, e \in P^i, \forall\, f \in P^j, i \neq j \quad (22)$$

$$l_{ie} y_{ki} + \alpha_{kie} = \gamma_{kie} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (23)$$

$$L_k \geq l_{ie} y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (24)$$

$$\alpha_{kie} \leq (L_k - l_{ie}) y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (25)$$

$$C_k \geq c_{ie} y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (26)$$

$$\beta_{kie} \leq (C_k - c_{ie}) y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (27)$$

$$\gamma_{kie} \geq \alpha_{kie} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (28)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} l_{ie} c_{ie} y_{ki} \leq L_k C_k \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \quad (29)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in NT} x_{kij} = 1 \qquad \forall\, i \in N, i \neq j \quad (30)$$

$$\sum_{j \in N} x_{k0j} \leq 1 \qquad \forall\, k \in K \quad (31)$$

$$\sum_{i \in NT} x_{kih} - \sum_{j \in NT} x_{khj} = 0 \qquad \forall\, k \in K, \forall\, h \in N, i \neq h, j \neq h \quad (32)$$

$$\sum_{i \in N0} x_{ki(np+1)} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (33)$$

$$x_{k(np+1)j} = 0 \qquad \forall\, k \in K, \forall\, j \in NT \qquad (34)$$

$$x_{ki0} = 0 \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in NT \qquad (35)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} q_{ie} y_{ki} \leq Q_k \qquad \forall\, k \in K \qquad (36)$$

$$\sum_{i \in N0} \sum_{j \in N1} (t_{ij} + ta_i) x_{kij} \leq TL_k \qquad \forall\, k \in K, i \neq j \qquad (37)$$

$$w_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} \left(\alpha_{kie} - \left(\frac{(L_k - l_k)}{2} \right) \right) q_{ie}\, y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, L_k \geq l_{ie} \qquad (38)$$

$$w_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} \left(\left(\frac{(L_k - l_k)}{2} \right) - \alpha_{kie} \right) q_{ie}\, y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, L_k \geq l_{ie} \qquad (39)$$

$$w_k \geq 0 \qquad \forall\, k \in K \qquad (40)$$

$$qt_{kj} \geq qt_{ki} + \sum_{e \in P^i} q_{ie} - (M\,(1 - x_{kij})) \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, j \in N, i \neq j \qquad (41)$$

$$qt_{ki} \geq 0 \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N \qquad (42)$$

$$qt_{ki} \leq Q_k \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N \qquad (43)$$

$$\alpha_{kie} \in Z^+ \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \qquad (44)$$

$$\beta_{kie} \in Z^+ \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \qquad (45)$$

$$\gamma_{kie} \in Z^+ \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \qquad (46)$$

$$w_k \in R^+ \qquad \forall\, k \in K \qquad (47)$$

$$qt_{ki} \in R^+ \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N \qquad (48)$$

$$x_{kij} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i, j \in NT \qquad (49)$$

$$y_{ki} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N0 \qquad (50)$$

$$\delta_{kiejf} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i, j \in N, \forall\, e \in P^i, \forall\, f \in P^j \qquad (51)$$

$$\sigma_{kiejf} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i, j \in N, \forall\, e \in P^i, \forall\, f \in P^j \qquad (52)$$

A função objetivo (18) representa a minimização da distância percorrida e da quantidade de navios usados, o que reduz os custos variáveis e fixos, respectivamente; do comprimento do

convés do navio utilizado para a disposição das cargas e da diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos da embarcação com o intuito de manter o equilíbrio náutico.

As restrições (19) indicam se o navio k atende a plataforma i ou não. As restrições (20) garantem que a largura de uma carga não irá sobrepor a largura de outra carga. As restrições (21) asseguram que o comprimento de uma carga não irá sobrepor o comprimento de outra carga. As restrições (22) garantem que não haverá sobreposições das áreas retangulares das cargas e que a carga demandada por uma mesma plataforma vai ocupar apenas um dos navios. As restrições (20), (21) e (22) têm em comum a parcela $\left(\left(2 - y_{ki} - y_{kj}\right) M\right)$, que é utilizada para ativar a restrição.

As restrições (23) representam que a posição final de colocação da carga e em relação ao eixo da largura L_k do navio deve ser a soma da largura da carga, l_{ie}, com a posição de colocação inicial da carga e em relação ao eixo da largura L_k do navio.

Caso a plataforma i seja atendida pelo navio k, suas cargas, $e \in P^i$, deverão ser arrumadas no convés do navio k e, portanto, as restrições (24) e (25) são ativadas. As restrições (24) garantem que a carga e terá largura l_{ie} menor ou igual que a largura L_k do navio. As restrições (25) asseguram a posição de colocação inicial da carga e em relação ao eixo da largura L_k do navio deverá estar contida no intervalo de posicionamento que varia de 0 até a largura L_k do navio subtraída da largura da carga, l_{ie}. Dessa forma, nenhuma carga será posicionada além dos limites de largura do convés do navio.

Caso a plataforma i seja atendida pelo navio k, suas cargas, $e \in P^i$, deverão ser arrumadas no convés do navio k e, portanto, as restrições (26) asseguram que a carga atribuída ao navio k terá comprimento c_{ie} menor ou igual que o comprimento C_k do navio. As restrições (27) garantem que a posição de colocação inicial de comprimento ocupada por cada carga e em relação ao eixo do comprimento C_k do navio deverá estar contida no intervalo de posicionamento que varia de 0 até o comprimento do navio C_k subtraído do comprimento da carga c_{ie}. Assim, nenhuma carga será posicionada além dos limites de comprimento do convés do navio.

As restrições (28) limita os valores de γ_{kie}, que devem ser obrigatoriamente maiores que o valor de α_{kie}, que é a posição inicial de colocação da carga no eixo da largura do navio.

As restrições (29) impõem que a área total ocupada pelos itens que estão em um dado navio deve ser menor ou igual à superfície de carregamento disponível no navio. Apesar de

redundantes, as restrições (29) tem a finalidade de promover um corte para reduzir o espaço de busca. As restrições (30) garantem que cada plataforma i seja servida por exatamente um navio. As restrições (31), (32) e (33) representam restrições de fluxo em redes, que exigem que cada navio k parta do porto (nó 0) somente uma vez, deixe o nó h se e somente se entrar neste nó, e retorne ao porto (nó $np + 1$) somente uma vez.

As restrições (34) impedem que $np + 1$, que representa o porto ao final do fluxo, faça rota com outros nós. As restrições (35) não permitem que os navios retornem ao nó 0, que representa o porto no início do fluxo. As restrições (36) impõem que a demanda total de cada rota do navio k não excede sua capacidade Q_k. As restrições (37) limitam o tempo máximo que o navio k pode operar.

As restrições (38) e (39) conjugadas equivalem ao módulo de momento calculado para o navio. Para efetuar o cálculo do momento, considera-se somatória da diferença entre a metade da largura L_k do convés e a metade da largura l_{ie} da carga, subtraída de α_{kie}, e multiplicada pelo peso da carga. Essa somatória, minimizada na função objetivo, é multiplicada por um parâmetro de calibração $\mu = 10$, pois ao adotar um peso maior para esta parcela, força-se que este valor o mais próximo de zero, de forma a garantir o equilíbrio. Já as restrições (40) garantem a não-negatividade da variável w_k.

As restrições (41) asseguram que o peso qt_{kj} transportado pelo navio k na plataforma j seja maior ou igual peso qt_{ki} transportado pelo navio k quando chega à plataforma i somado ao peso das cargas da plataforma i. A parcela $(M\left(1 - x_{kij}\right))$ serve para ativar a restrição, ao verificar se o navio k viajará direto da plataforma i para a plataforma j. As restrições (42) mostram que qt_{ki} é maior ou igual a zero. As restrições (43) garantem que o peso transportado pelo navio k na plataforma i não ultrapasse a capacidade Q_k do navio. As restrições (41) a (43) têm por função a eliminação de sub-rotas.

As restrições (44), (45) e (46) indicam que α_{kie}, β_{kie} e γ_{kie} são variáveis inteiras positivas. As restrições (47) e (48) mostram que w_k e qt_{ki} são variáveis reais positivas. As restrições (49), (50), (51) e (52) indicam que x_{kij}, y_{ki}, δ_{kiejf} e σ_{kiejf} são variáveis binárias.

A formulação descrita anteriormente é não linear por causa das restrições (38) e (39), já que para calcular o momento de cada navio ocorre a multiplicação da variável inteira α_{kie} e da variável binária y_{ki}. Considerando que $0 \leq \alpha_{kie} \leq (L_k - l_{ie})$, sendo que $(L_k - l_{ie})$ resulta em uma constante, tais restrições podem ser linearizadas por meio da introdução da variável z_{kie} e das seguintes restrições:

$$z_{kie} \leq (L_k - l_{ie})\, y_{ki} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i, L_k \geq l_{ie} \tag{53}$$

$$z_{kie} \leq \alpha_{kie} \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \tag{54}$$

$$z_{kie} \geq \alpha_{kie} - ((L_k - l_{ie})(1 - y_{ki})) \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i, L_k \geq l_{ie} \tag{55}$$

$$z_{kie} \geq 0 \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \tag{56}$$

$$z_{kie} \in R^+ \qquad \forall\, k \in K, \forall\, i \in N, \forall\, e \in P^i \tag{57}$$

Neste caso, se $y_{ki} = 0$, tem-se que $z_{kie} = 0$. Se $y_{ki} = 1$, então (55) torna-se $z_{kie} \geq \alpha_{kie}$, que combinado com (54), implica $z_{kie} = \alpha_{kie}$. A restrição (57) mostra que z_{kie} é variável real positiva. Assim, as restrições (38) e (39) podem ser substituídas, respectivamente, pelas restrições (58) e (59):

$$w_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} \left(z_{kie} - \left(\frac{(L_k - l_k)}{2} y_{ki} \right) \right) q_{ie} \qquad \forall k \in K, L_k \geq l_{ie} \tag{58}$$

$$w_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{e \in P^i} \left(\left(\frac{(L_k - l_k)}{2} y_{ki} \right) - z_{kie} \right) q_{ie} \qquad \forall k \in K, L_k \geq l_{ie} \tag{59}$$

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para efetuar os testes, construiu-se um conjunto de 17 instâncias conforme descrito na seção 3.2.4. Ressalta-se que os dados das instâncias reais foram obtidos em manifestos de cargas da Petrobras de maio/2014 e de dezembro/2014. Esses testes foram executados usando o *software* CPLEX 12.6.

A Tabela 8 apresenta a nomenclatura de cada instância; a quantidade de plataformas correspondente; a quantidade de PSVs disponíveis; a quantidade limite de dias que um navio pode navegar; a variação (Δ) de cargas demandadas por plataforma; e as cargas totais de cada instância. A coluna variação (Δ) de cargas demandadas por plataforma representa a variação possível, mínima e máxima, do número de cargas em cada uma das plataformas da instância testada.

Tabela 8 - Conjunto de instâncias criadas

Instância	**Quantidade de Plataformas**	**Quantidade de PSV disponível**	**Quantidade de dias**	**Δ de cargas por plataforma**	**Cargas Totais**
$432R_1$_C	4	3	2	$1-6$	17
$432R_2$_C	4	3	2	$1-8$	30
$532R_1$_C	5	3	2	$1-4$	15
$533R_1$_C	5	3	3	$1-4$	17
$632R_1$_C	6	3	2	$1-4$	18
$732R_1$_E	7	3	2	$1-3$	14
$733R_2$_E	7	3	3	$1-3$	13
$833R_1$_E	8	3	3	$1-2$	13
$832T_1$_E	8	3	2	$1-2$	13
$832T_2$_E	8	3	2	$1-4$	29
$842T_1$_E	8	4	2	$1-4$	32
$842R_1$_C	8	4	2	$1-8$	47
$933R_1$_C	9	3	3	$1-1$	9
$1242T_1$_C	12	4	2	$1-2$	24
$1242T_2$_C	12	4	2	$1-4$	32
$1552T_1$_C	15	5	2	$1-2$	30
$1552T_2$_C	15	5	2	$1-3$	45

Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos pelos testes computacionais para cada instância, listando-se o número de navios que foram utilizados para atender as demandas das

plataformas (1); a soma da distância, em Km, navegada por toda a frota usada (2); a soma dos momentos náuticos da frota usada (3); o GAP (4); e o tempo de execução em segundos (5). Também se mostram o número de navios (6) e a distância total percorrida (7) do caso real. Na coluna (8), avalia-se o ganho percentual obtido em termos de distância comparando-se o resultado do modelo com a situação real.

Ressalta-se que a função objetivo representa a minimização da somatória dos custos variáveis, diretamente relacionados com a distância percorrida; dos custos fixos, proporcionais à quantidade de navios usados; do comprimento do convés do navio utilizado e da diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos da embarcação com o intuito de manter o equilíbrio náutico. Todas essas parcelas apresentam unidades dimensionais diferentes. Por isso, para facilitar a análise comparativa dos resultados, optou-se por mostrar na Tabela 9, especificamente, a quantidade de navios, a distância navegada e o momento total.

Tabela 9 - Resultados apresentados pelo CPLEX para as instâncias criadas

	WB2L-HFVRP (CPLEX)					Real		Ganho WB2L-HFVRP x Real (%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Instância	Nº de navios	Distância Total (Km)	w_k Total (t.m)	GAP	Tempo de Execução (s)	Nº de navios	Distância Total (km)	Distância Total (%)
$432R_1$_C	1	406,98	0,0085	0,04%	14400	1	407,43	0,11%
$432R_2$_C	1	438,58	0,023	0,30%	14400	1	438,58	0,00%
$532R_1$_C	1	305,70	0,103	0,04%	14400	1	355,60	14,03%
$533R_1$_C	1	603,34	0,0085	0,07%	14400	1	640,65	5,82%
$632R_1$_C	1	413,53	0,033	0,03%	14400	1	424,78	2,65%
$732R_1$_E	2	548,91	0,0745	**0,00%**	165,55	2	560,15	2,00%
$733R_2$_E	1	491,92	0,177	**0,00%**	71,09	1	504,07	2,40%
$833R_1$_E	1	580,98	0,121	**0,00%**	53,78	1	614,83	5,50%
$832T_1$_E	2	743,14	0,122	**0,00%**	20,78	–	–	–
$832T_2$_E	3	1055,69	0,01	**0,00%**	41,42	–	–	–
$842T_1$_E	4	1013,89	0,055	**0,00%**	2,00	–	–	–
$842R_1$_C	2	845,56	0,004	43,14%	14400	2	846,01	0,05%
$933R_1$_C	1	599,98	0,036	**0,00%**	299,02	1	803,3	25,0%
$1242T_1$_C	4	1292,54	1,505	**0,00%**	1185,97	–	–	–
$1242T_2$_C	4	1357,56	0,055	0,01%	14400	–	–	–
$1552T_1$_C	5	1756,19	1,505	0,03%	14400	–	–	–
$1552T_2$_C	5	1756,19	0,895	23,17%	14400	–	–	–

Analisando a Tabela 9, nota-se que o CPLEX conseguiu resolver otimamente oito das 17 instâncias, as quais estão destacadas em negrito na tabela.

No que tange ao total de instâncias criadas, 10 constituem cenários reais, sendo sete referentes à Bacia de Campos e três relativos à Bacia do Espírito Santo, representados pelas instâncias $432R_1$_C, $432R_2$_C, $532R_1$_C, $533R_1$_C, $632R_1$_C, $732R_1$_E, $733R_2$_E, $833R_1$_E, $842R_1$_C e $933R_1$_C.

No que se refere à distância navegada das instâncias baseadas em dados reais, alcançou-se uma redução de 0,11%, 0,00%, 14,03%, 5,82%, 2,65%, 2,00%, 2,40%, 5,50%, 0,05% e 25,0% respectivamente em relação ao real. Isso representa uma economia de 357,25Km, o que impactaria diretamente nos custos variáveis. Isso leva a concluir que caso fossem analisadas todas as operações desta empresa, poder-se-ia ter ganhos muito expressivos.

Quanto ao número de navios usados, não houve diferenças entre o real e o gerado pelo modelo, provavelmente, por conta das dimensões e pesos das cargas, o que não permitiria acomodar todas em um único navio.

A instância $832T_1$_E foi criada com base na $833R_1$_E para avaliar a influência do tempo limite de viagem na formação das rotas para a Bacia do Espírito Santo. O tempo de 48h foi fator determinante na configuração das rotas, uma vez que seria impossível, dadas as características de velocidade do navio e tempo adotadas, realizar uma rota envolvendo todas as plataformas no tempo de 48h. A partir disso, percebeu-se, para a Bacia do Espírito Santo, a tendência de clusterização de plataformas que se encontram ao norte do CPVV e das que se localizam ao sul do CPVV. Este tipo de agrupamento era esperado, dada à proximidade geográfica entre as plataformas posicionadas ao norte e ao sul do CPVV.

A solução da instância $832T_2$_E, que contém 29 cargas, usou os três navios disponíveis e gerou três rotas com no máximo três plataformas. A instância $842T_1$_E, que tem 32 cargas ao todo e usou quatro navios, foi resolvida no menor tempo de execução entre as 17 instâncias, levando apenas dois segundos. Isso se deve ao fato de que havia mais cargas que estavam melhores ajustadas às características de área e peso dos navios e isso permitiu encontrar uma solução mais rapidamente. Formaram-se quatro rotas de duas plataformas.

As instâncias $1242T_1$_C, $1242T_2$_C, $1552T_1$_C, $1552T_2$_C foram criadas com o intuito de verificar o comportamento do modelo para instâncias de maior escala em termos de quantidade de plataformas, cargas e navios. Neste caso, as dimensões e pesos das cargas foram propositalmente aumentados para forçar o uso de mais navios e assim avaliar como o modelo reagiria à inclusão de mais embarcações na solução. A solução das instâncias $1242T_1$_C e $1242T_2$_C, que contêm 12 plataformas e se diferenciam pela quantidade de

cargas demandas, utilizou os quatro navios disponíveis e gerou quatro rotas com no máximo três plataformas. Já na solução das instâncias $1552T_1$_C e $1552T_2$_C, que apresentam 15 plataformas e também se distinguem pela quantidade de cargas, foram formadas cinco rotas de três plataformas usando cinco navios.

No que diz respeito aos *gaps*, com exceção da $933R_1$_C e da $1242T_1$_C, nota-se que as instâncias da Bacia de Campos, mesmo as que continham apenas quatro plataformas, não atingiram a solução ótima. Atribui-se como principal motivo de ocorrência deste *gap* o aspecto de carregamento do problema, influenciado por três fatores: 1) a quantidade de cargas arrumadas em um mesmo navio; 2) a quantidade de cargas demandadas por plataforma; e 3) a dimensão das cargas.

Em relação ao primeiro fator, observou-se que foi possível obter solução ótima arrumando até 13 cargas em um mesmo navio, conforme instâncias $733R_2$_E e $833R_1$_E. Em contrapartida, ao se analisar as instâncias $432R_1$_C, $432R_2$_C, $532R_1$_C, $533R_1$_C, $632R_1$_C nota-se que apresentaram gap, mesmo contemplando menos plataformas que as instâncias $733R_2$_E e $833R_1$_E, pois efetuaram a arrumação de 15 a 30 cargas em um mesmo navio. A Figura 27 ilustra a solução gerada pelo modelo para a instância $833R_1$_E, arrumando 13 cargas no convés de um PSV4500 e a Figura 28 mostra a solução para a instância $432R_2$_C em um PSV3000, contendo 30 cargas.

Figura 27 - Arrumação obtida para a instância $833R_1$_E, com 13 cargas em um PSV4500

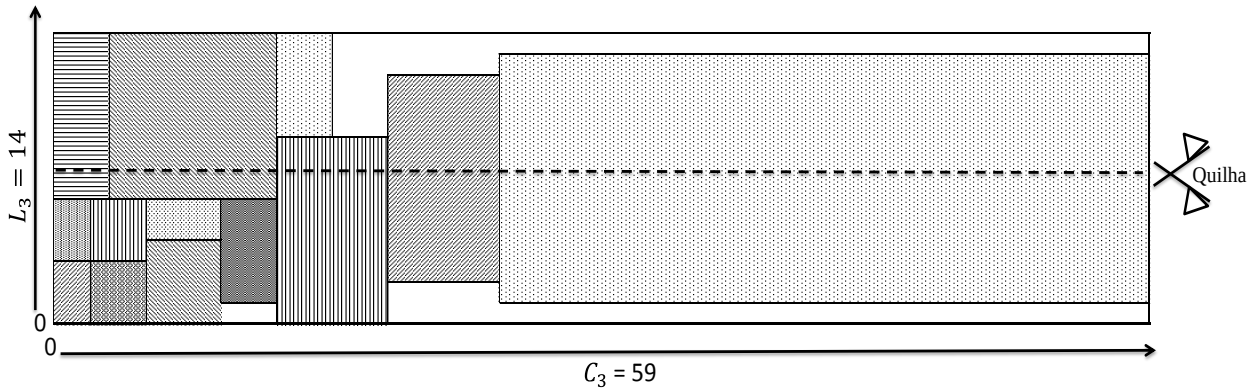
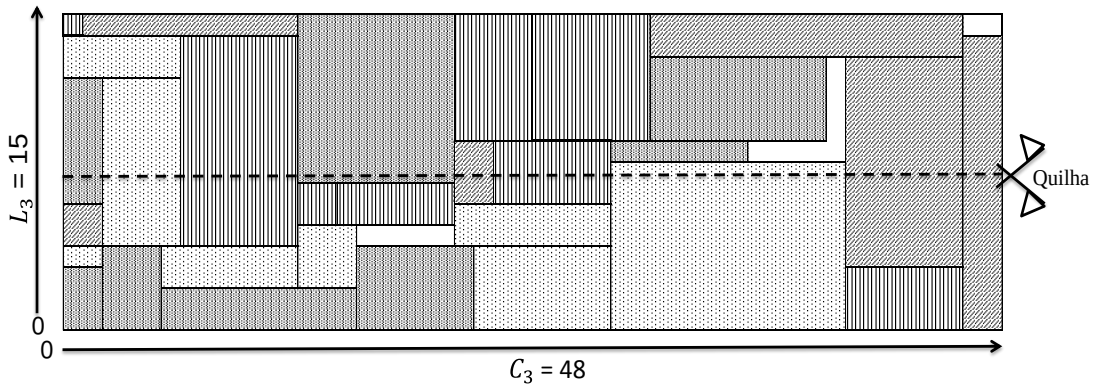


Figura 28 - Arrumação obtida para a instância $432R_2$_C, com 30 cargas em um PSV3000



No que concerne ao segundo fator, em geral, quanto maior a quantidade de cargas demandas por plataforma, mais difícil solucionar o problema e, portanto, mais complexo encontrar a solução ótima. A partir dos testes efetuados sabe-se que o modelo não suporta uma quantidade muito grande de cargas demandadas por plataformas. As instâncias $832T_1$_E e $842R_1$_C, por exemplo, são cenários diferentes, mas apresentam a mesma quantidade de plataformas e de navios utilizados. Enquanto a demanda da instância $832T_1$_E variou até no máximo duas cargas por plataforma, a demanda da instância $842R_1$_C variou até no máximo oito cargas por plataforma. Isso impactou na solução final, pois se verificou um *gap* de 0,00% para a primeira e de 43,14% para a segunda. Situação análoga pode ser percebida entre os pares $1242T_1$_C e $1242T_2$_C, e $1552T_1$_C e $1552T_2$_C. A Figura 29 e a Figura 30 ilustram a arrumação obtida para as instâncias $832T_1$_E e $842R_1$_C, respectivamente.

Figura 29 - Arrumação obtida para a instância 832T$_1$_E: a) Seis cargas em um PSV 1500; b) Sete cargas em um PSV3000

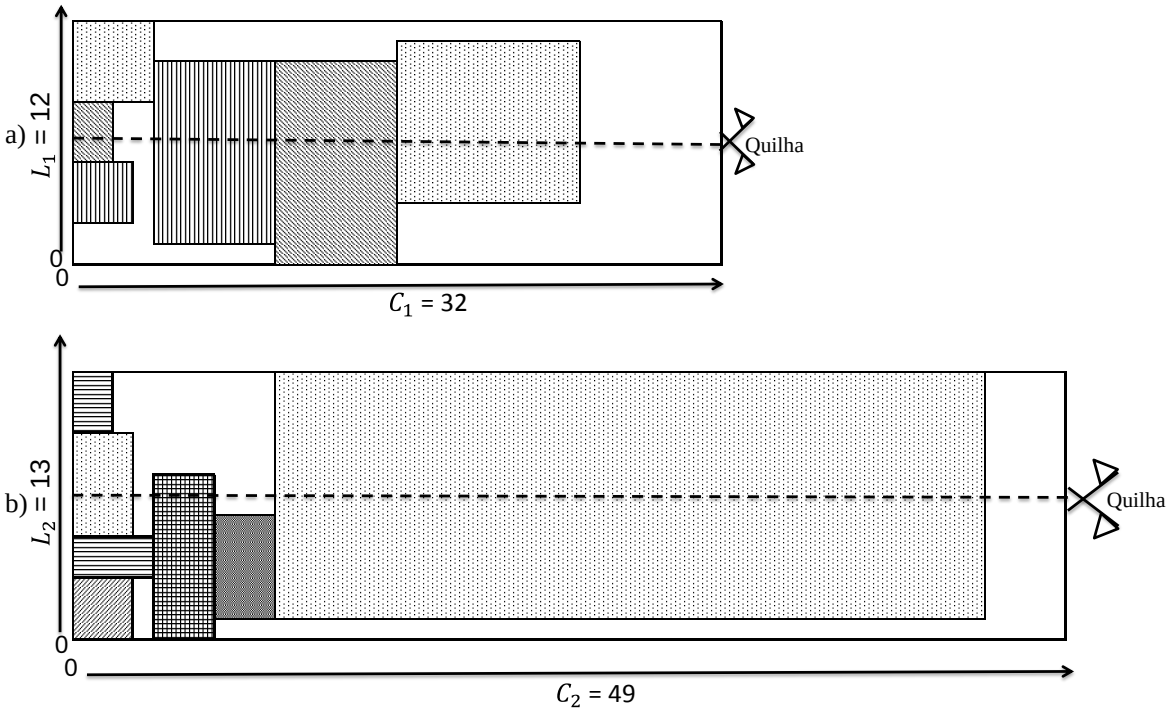
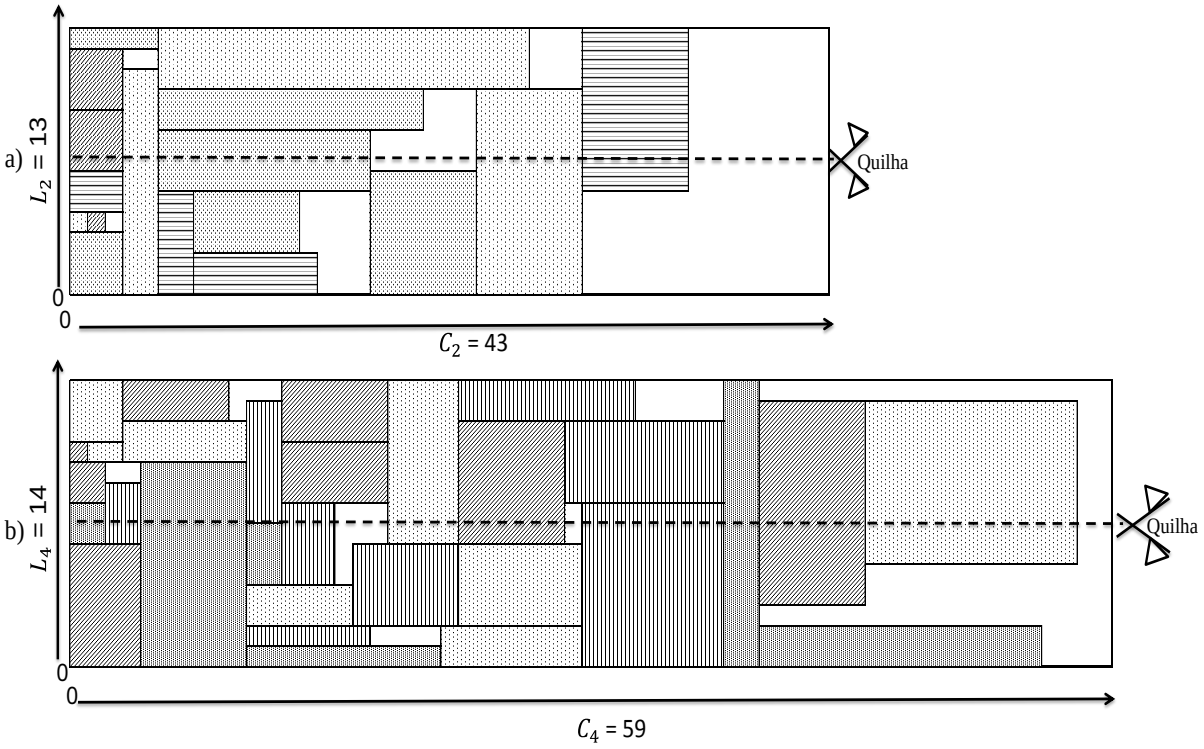


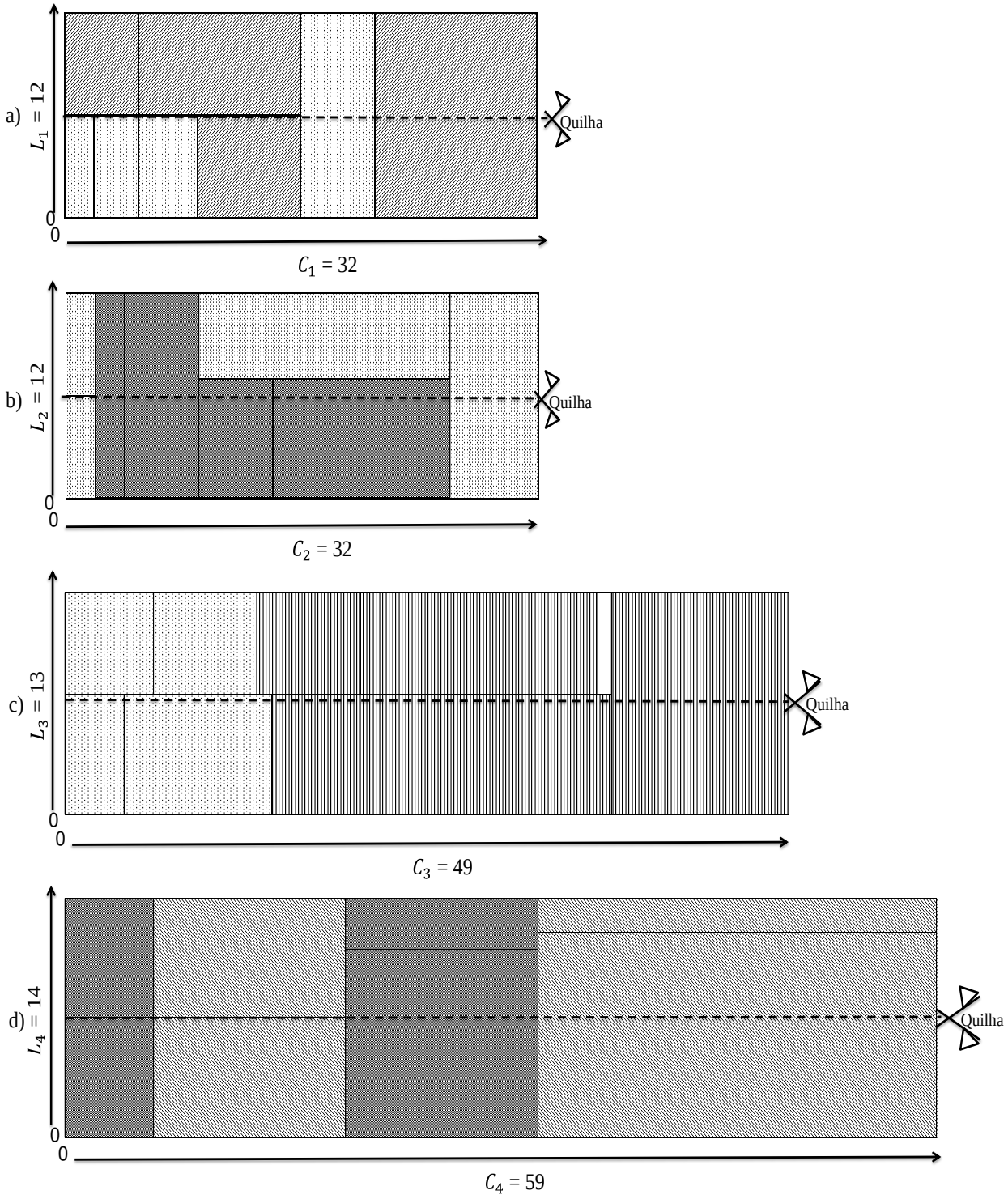
Figura 30 - Arrumação obtida para a instância 842R$_1$_C: a) 17 cargas em um PSV3000; b) 30 cargas em um PSV4000



No que concerne ao terceiro fator, de modo geral, quanto menor a dimensão das cargas demandadas, o problema torna-se mais complexo, pois haverá uma maior dificuldade combinatorial. Por sua vez, o contrário também é verdadeiro, ou seja, quanto maiores as

dimensões das cargas, mais fácil será encontrar a solução. Um exemplo desse caso pode ser observado na instância 842T$_1$_E, que obteve *gap* de 0,00% e tempo de execução de 2 segundos, cuja arrumação é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Arrumação obtida para a instância 842T$_1$_E: a) Oito cargas em um PSV1500; b) Oito cargas em um PSV1500; c) Oito cargas em um PSV3000; d) Oito cargas em um PSV4500



Os três fatores, embora apresentados separadamente, não se excluem. Ou seja, a ocorrência de um não implica na não ocorrência do outro. Por fim, pode-se afirmar que o aspecto de

carregamento impactou fortemente na solução do problema e no tempo de execução do modelo.

Além disso, percebeu-se que a inserção de plataformas no problema exerce uma influência menor na questão do *gap*. É possível avaliar tal situação com base nas instâncias $933R_1$_C, $1242T_1$_C, $1552T_1$_C. A instância $933R_1$_C é uma instância baseada em dados reais, em que cada plataforma demandou apenas uma carga, e obteve solução ótima. As instâncias $1242T_1$_C e $1552T_1$_C, por sua vez, são de teste e a demanda por plataforma foi de duas cargas nos dois casos e para as duas instâncias foram arrumadas seis cargas em cada navio. Ou seja, a questão do carregamento não é preponderante nesta análise. Assim sendo, o *gap* de 0,01% observado na instância $1552T_1$_C provavelmente ocorreu em função do aumento do número de plataformas de 12 para 15, já que a instância $1242T_1$_C apresentou *gap* de 0,00%. A Figura 32 mostra a configuração do carregamento de cargas para as instâncias $933R_1$_C, $1242T_1$_C e $1552T_1$_C, respectivamente.

Figura 32 - Arrumação obtida para a instância $933R_1$_C, com nove cargas em um PSV1500

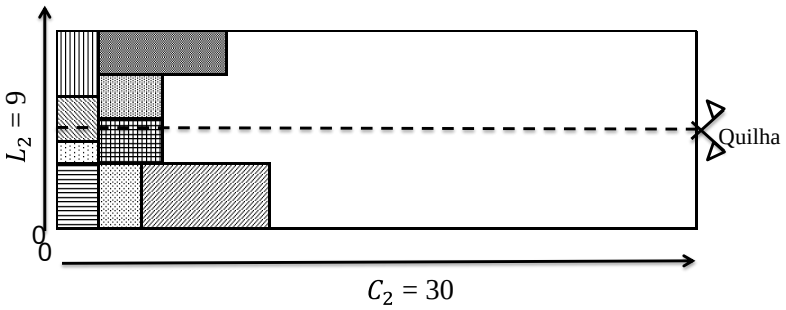


Figura 33 - Arrumação obtida para a instância 1242T$_1$_C: a) Seis cargas em um PSV1500; b) Seis cargas em um PSV3000; c) Seis cargas em um PSV4500; d) Seis cargas em um PSV4500

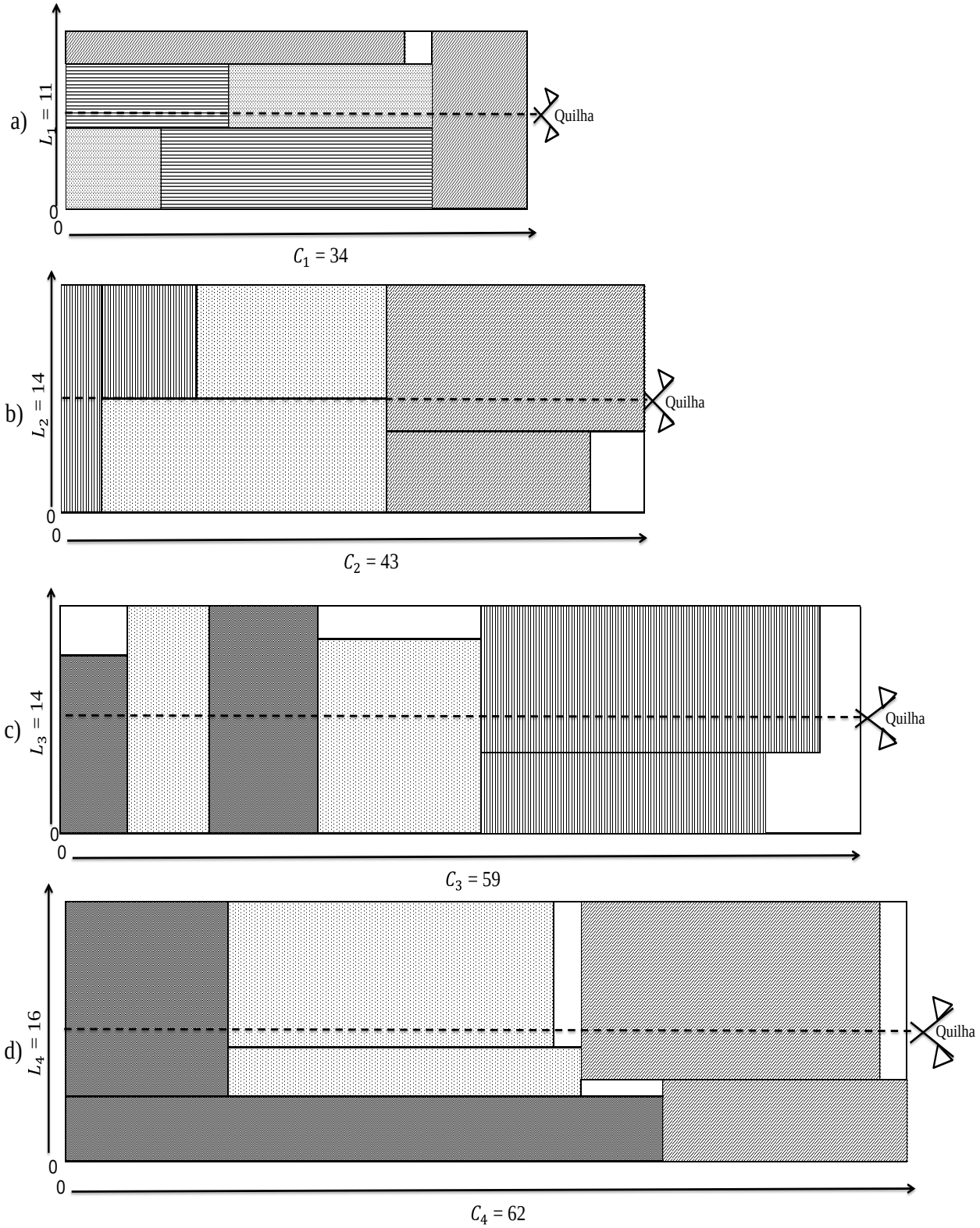
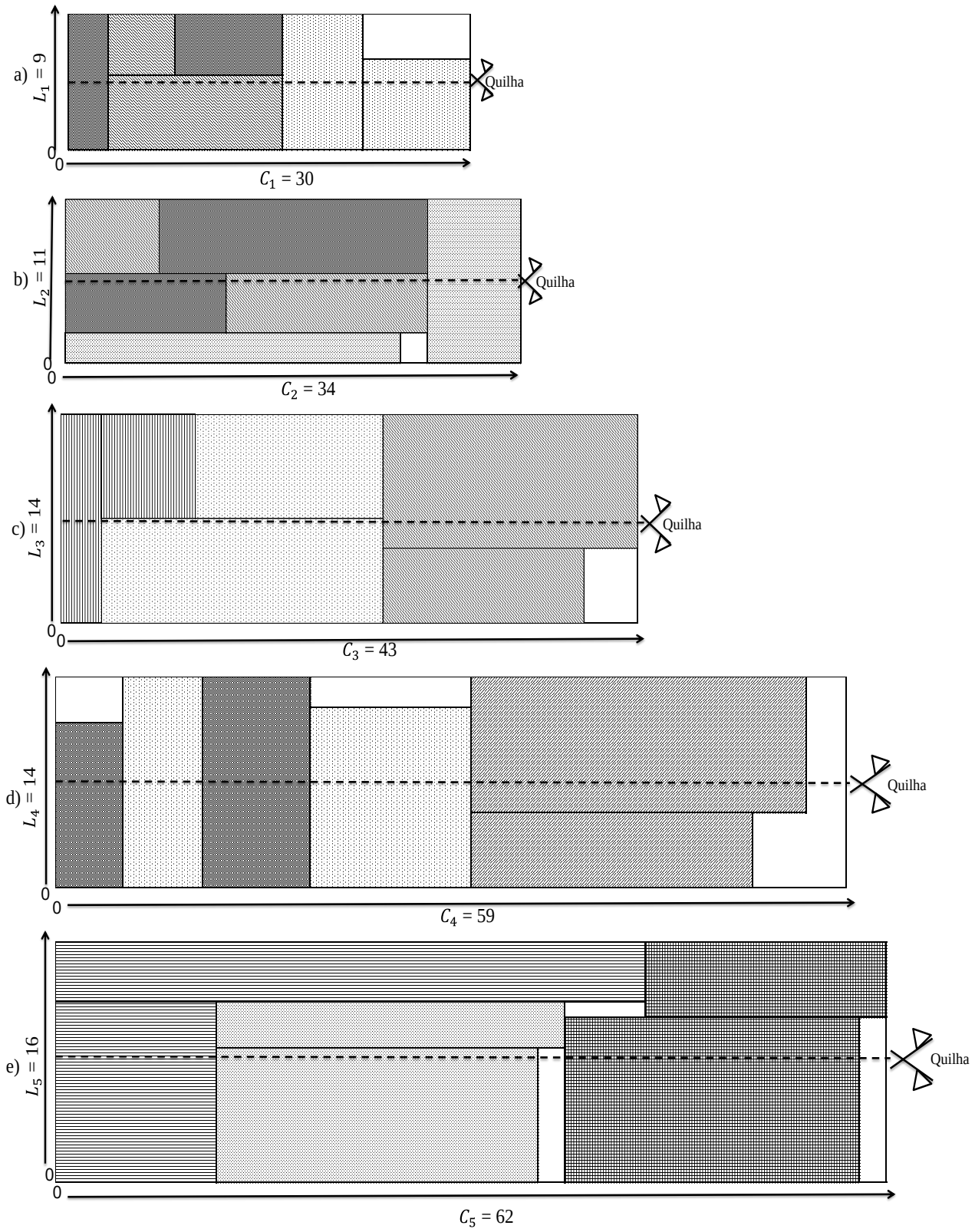


Figura 34 - Arrumação obtida para a instância 1552T$_1$_C: a) Seis cargas em um PSV1500; b) Seis cargas em um PSV1500; c) Seis cargas em um PSV3000; d) Seis cargas em um PSV4500; e) Seis cargas em um PSV4500



De modo geral, observou-se que instâncias com menor quantidade de plataformas se comportam melhor com o aumento do número de cargas demandadas por plataforma. Isso pode ser exemplificado pelas instâncias 432R$_2$_C e 842R$_1$_C, que apresentavam demandas de

até oito cargas por plataforma. Contudo, enquanto a primeira retornou um *gap* de 0,30%, a segunda apresentou um *gap* de 43,14%.

No que se refere ao equilíbrio náutico das embarcações, analisando todo o conjunto de instâncias criadas, os momentos encontrados para cada navio foram, em sua maioria, menores que 1 t.m, havendo dois casos (dois navios nas instâncias $1242T_1$_C, $1552T_1$_C) em que os navios atingiram momento igual a 1,485 t.m. Isso pode ser explicado pelo fato de que nessas instâncias, o peso atribuído à cada carga foi muito superior ao que ocorre na realidade, pois havia necessidade de se testar o uso de mais de dois navios na construção das rotas. Em contrapartida, ao se avaliar apenas as instâncias baseadas em dados reais, observou-se, justamente pelo fato de as instâncias terem pesos mais próximos do real, o retorno de resultados mais eficazes, com o momento para todos os navios não sendo superior a 0,2 t.m. Isso demonstra que o modelo é eficaz no que se refere ao alcance do equilíbrio náutico do navio.

Por questões de sigilo da empresa, não foram disponibilizadas informações que permitissem comparações entre o modelo e a situação real quanto à disposição das cargas no convés e sobre o equilíbrio náutico.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo geral desenvolver um modelo matemático baseado no 2L-CVRP para a roteamento de navios de suprimentos entre o porto e as plataformas *offshore* prevendo a arrumação da carga no convés de forma a manter o equilíbrio náutico do navio.

O modelo proposto, denominado *Weight Balance Two-Dimensional Loading Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* (WB2L-HFVRP), se diferencia por considerar uma frota heterogênea de navios e utilizar uma função objetivo que visa minimizar o número de navios, a distância percorrida, e a diferença entre os pesos distribuídos entre os bordos do navio.

Constatou-se, pela revisão da literatura realizada, que nenhum problema de roteamento de navios de suprimento *offshore* usou o 2L-CVRP e que, entre as publicações do 2L-CVRP, nenhuma abordava simultaneamente sobre frota heterogênea e equilíbrio náutico. Portanto, essa consiste em uma nova contribuição para o meio científico.

O modelo foi testado em instâncias baseadas em dados reais da Petrobras no *software* CPLEX 12.6, conseguindo obter economias em relação à distância percorrida de até 25,0%. Contudo, a partir de testes efetuados também se observou a ocorrência de *gaps*, mesmo para instâncias contendo apenas quatro plataformas. A principal razão para isso foi atribuída ao aspecto de carregamento do problema, regido por três fatores: a quantidade de cargas arrumadas em um mesmo navio; a quantidade de cargas demandadas por plataforma; e a dimensão das cargas. Notou-se que o modelo não conseguiu revolver otimamente instâncias em que eram arrumadas mais de 13 cargas em um mesmo navio. Além disso, mesmo impactando menos na questão do *gap*, também há o aspecto de roteamento do problema, cuja dificuldade é expressa pelo aumento da quantidade de plataformas. Conseguiu-se resolver otimamente instâncias com até 12 plataformas. Como as características de roteamento e carregamento acabam se influenciando, de modo geral, observou-se que instâncias com menor quantidade de plataformas se comportaram melhor com o aumento do número de cargas demandadas por plataforma.

Sabe-se que a aplicação real demonstrada lidou com exemplos de pequena escala e que podem existir situações com mais cargas, mais plataformas e mais navios, o que certamente dificultaria encontrar uma solução via abordagem exata, dada a dificuldade combinatorial inerente ao problema.

Conclui-se, pois, que, embora limitado, o modelo proposto atingiu resultados significativos em termos de minimização das distâncias percorridas e também no que se refere ao equilíbrio

de peso entre os bordos do navio na saída do porto, atendendo, assim, aos objetivos desta dissertação.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A solução apresentada pelo modelo proposto resulta em cargas de uma mesma plataforma dispersas na área do convés do navio. Para tornar o resultado do modelo proposto mais real, sugere-se realizar uma clusterização nos dados de entrada, a fim de agrupar as todas as cargas de uma plataforma em uma mesma área e usar esse *input* no modelo apresentado. Dessa forma, conseguir-se-ia tratar problemas reais de médio porte.

Outra sugestão é a incorporação, não necessariamente ao mesmo tempo, dos seguintes aspectos: a colocação de corredor entre as cargas; a realização de operações de entrega e coleta de carga das plataformas; o uso de janelas de tempo, tanto nas operações do porto quanto das plataformas; a possibilidade de rotacionar a carga; a inclusão de periodicidade da frota no problema; o transporte de múltiplas cargas em navios com múltiplos compartimentos; o uso de estocasticidade na definição da demanda das plataformas; a limitação do espaço usado em uma plataforma.

Por fim, conforme já mencionado, o modelo proposto é limitado e consegue solucionar problemas de pequeno porte. Sendo assim, para alcançar resultados de grande escala, é necessário desenvolver heurísticas e/ou meta-heurísticas.

7 REFERÊNCIAS

AAS, B.; GRIBKOVSKAIA, I.; HALSKAU, SR Ø.; SHLOPAK, A. Routing of supply vessels to petroleum installations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, n. 2, p. 164-179, 2007.

ABDAL-HAMMED, M.K.; HIFI, M.; WU; L. Large neighborhood search for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **In: International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT).** IEEE, p. 054-059, 2014.

ABEAM – Associação Brasileira das Empresas de Apoio Marítimo. **O Mercado de Apoio Offshore.** Março, 2010.

A GAZETA. **Novos terminais e plataformas no Estado: Plano confirma nova unidade na área de gás no Norte até 2016.** Reportagem de 26/06/2012. Disponível em: http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2012/06/noticias/a_gazeta/economia/1287494-novos-terminais-e-plataformas-no-estado.html. Acesso em 15 de janeiro de 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Panorama da Navegação Marítima e de Apoio.** ANTAQ, 2012.

AGUIAR, R. A. **Estudo do Impacto da Ampliação de Berço e de Área de Pátio no Aumento da Capacidade Operacional de uma Base de Apoio *Offshore*.** 2013. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

ALMEIDA, M. R. de. Algoritmos Genéticos Aplicados a Programação de Embarcações de Apoio às Operações Offshore. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41, 2009, Salvador. **Anais** ... Salvador: SOBRAPO, 2009.

ALVAREZ-VALDES, R.; PARREÑO, F.; TAMARIT, J. M. A GRASP algorithm for constrained two-dimensional non-guillotine cutting problems. **Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 4, p. 414-425, 2005.

ANEICHYK, T. **Simulation model for strategical fleet sizing and operational planning in offshore supply vessels operations.** 2009. Thesis (Master in Logistics) – Molde University College, Norway, 2009.

ARAUJO, O. C. B. de. **Problemas de corte e empacotamento tridimensional e integração com roteamento de veículos**. 2006. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

ARAUJO, R. R. de. **Uma abordagem de resolução integrada para os problemas de roteirização e carregamento de veículos.** 2010. 173 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para os Cursos de Engenharia**, Rio de Janeiro: Campos - Elsevier, 2007.

ARPINI, B. P.; ROSA, R. de A.; AMARAL, A. R. S. Planejamento da Logística de Suprimento de Plataformas Offshore por Meio de um Modelo Matemático Não Linear 2l-Cvrp Com Frota Heterogênea e Equilíbrio Náutico. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 28, 2014, Curitiba. **Anais** ... Paraná: ANPET, 2014.

AZEVEDO, B. L. P. ; HOKAMA, P. H.; MIYAZAWA, F. K.; XAVIER, E. C. A branch-and-cut approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, v. 41, 2009.

BALDACCI, R.; CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A. An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. **Mathematical Programming**, v. 115, n. 2, p. 351-385, 2008.

BAKER, B. S.; COFFMAN JR., E. G.; RIVEST, R. L. Orthogonal packings in two dimensions. **SIAM Journal on Computing**, v. 9, n. 4, p. 846-855, 1980.

BEN MESSAOUD, S. Caractérisation, modélisation et algorithmes pour des problèmes de découpe guillotine. 2004. Thèse (Doctorat en Optimisation et sûreté des systèmes). University of Technology of Troyes, France, 2004.

BERKEY, J. O.; WANG, P. Y. Two-dimensional finite bin-packing algorithms. **Journal of the operational research society**, v. 38, n. 5, p. 423-429, 1987.

BERTSIMAS, D. J.; JAILLET, P.; ODONI, A. R. A priori optimization. **Operations Research**, v. 38, n. 6, p. 1019-1033, 1990.

BIN, W.; HONG, C.; ZHI-YONG, C. Artificial bee colony algorithm for two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem. **In: International Conference on Management Science and Engineering (ICMSE),** IEEE, p. 406-412, 2013.

BODIN, L.; GOLDEN, B. Classification in vehicle routing and scheduling. **Networks**, v. 11, n. 2, p. 97-108, 1981.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A.; BALL, M. O. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers & Operations Research**, v.10, n.2, p. 63-211, 1983.

BORTFELDT, A. A hybrid algorithm for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 9, p. 2248-2257, 2012.

BORTFELDT, A.; HOMBERGER, J.. Packing first, routing second—a heuristic for the vehicle routing and loading problem. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 3, p. 873-885, 2013.

BORTFELDT, A.; WÄSCHER, G. Constraints in container loading–A state-of-the-art review. **European Journal of Operational Research,** v. 229, n. 1, p. 1-20, 2013.

BOUSSAÏD, I.; LEPAGNOT, J.; SIARRY, P. A survey on optimization metaheuristics. **Information Sciences**, v. 237, p. 82-117, 2013.

BATISTA, B. C. D. **Análise das Operações com Embarcações de Apoio Offshore na Bacia de Campos-RJ**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BEASLEY, J. E. Route first—cluster second methods for vehicle routing. **Omega**, v. 11, n. 4, p. 403-408, 1983.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.02, p.241-264, 2002.

BREJON, S.; BRINATI, M. A**. Algoritmo para resolução do problema de programação do transporte de suprimentos para unidades marítimas de exploração de petróleo.** 1998. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

BROWN, G. G.; GRAVES, G. W. Real-time dispatch of petroleum tank trucks. **Management Science**, v. 27, n. 1, p. 19-32, 1981.

BURKE, E.K., KENDALL, G., WHITWELL G. A new placement heuristic for the orthogonal stock-cutting problem. **Operations Research**, v. 52, p. 655–671, 2004.

CHAJAKIS, E. D.; GUIGNARD, M. Scheduling deliveries in vehicles with multiple compartments. **Journal of Global Optimization**, v. 26, n. 1, p. 43-78, 2003.

CHAZELLE, B. The bottom-left bin packing heuristic: An efficient implementation. **IEEE Transactions on Computers**, v. 100, n. 8, p. 697-707, 1983.

CLARKE, G., WRIGHT, J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, v. 12, p. 568–581, 1964.

CLICK MACAÉ. **Diagrama do Fluxo de Petróleo na Bacia de Campos.** Disponível em: http://www.clickmacae.com.br/?sec=361&pag=pagina&cod=545. Acesso em 10 de janeiro de 2015.

COLES, A. J.; COLES, A. I.; FOX, M.; AND LONG, D. Forward-chaining partial-order planning. **In: Proceedings of the Twentieth International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)**, p. 42-49, 2010.

CORDEAU, J.-F.; GENDREAU, M.; HERTZ, A. ; LAPORTE, G. ; SORMANY, J.-S. **New heuristics for the vehicle routing problem.** Springer US, 2005.

CORNILLIER, F.; BOCTOR, F.; RENAUD, J. Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n. 2, p. 361-369, 2012.

CÔTÉ, J.-F.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. The Vehicle Routing Problem with Stochastic Two-Dimensional Items, **Centre Interuniversitaire de recherché sur les rèseaux d'entreprise, la logistique et le transport** *(CIRRELT*), CIRRELT-2013-84, 2013.

CURRENT, J.; MARSH, M. Multiobjective transportation network design and routing problems: Taxonomy and annotation. **European Journal of Operational Research**, v. 65, n. 1, p. 4-19, 1993.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The Truck Dispatching Problem. **Management Science,** Providence, US, v. 6, p. 80-91, 1959.

DYCKHOFF, H. A typology of cutting and packing problems**. European Journal of Operational Research,** v. 44, n. 2, p. 145-159, 1990.

DOERNER, K. F. et al. Metaheuristics for the vehicle routing problem with loading constraints. **Networks**, v. 49, n. 4, p. 294–307, 2007.

DOMINGUEZ, O.; JUAN, A. A.; FAULIN, J. A biased-randomized algorithm for the two-dimensional vehicle routing problem with and without item rotations. **International Transactions in Operational Research**, p. 1-14, 2014a.

DOMINGUEZ, O.; JUAN, A. A.; BARRIOS, B.; FAULIN, J.; AGUSTIN, A. Using biased randomization for solving the two-dimensional loading vehicle routing problem with heterogeneous fleet. **Annals of Operations Research**, p. 1-22, 2014b.

DUHAMEL, C.; LACOMME, P.; QUILLIOT, A.; TOUSSAINT, H. A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 3, p. 617-640, 2011.

DULLAERT, W.; SÖRENSEN, G.; VERNIMMEN, B. New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows, **Journal of the Operational Research Society**, v. 53, pp. 1232–1238, 2002.

DULLAERT, W.; BRÄYSY, O. Routing relatively few customers per route. **Top: An Official Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research**, v. 11, n. 2, p. 325-336, 2003.

EDELKAMP, S.; AND JABBAR; S. MIPS-XXL: Featuring External Shortest Path Search for Sequential Optimal Plans and External Branch-And-Bound for Optimal Net Benefit. **In: Short paper for the International Planning Competition**, Sydney, Australia, 2008.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc routing problems, part I: The Chinese postman problem. **Operations Research**, v. 43, n. 2, p. 231-242, 1995a.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc routing problems, part II: The rural postman problem. **Operations Research**, v. 43, n. 3, p. 399-414, 1995b.

EKSIOGLU, B.; VURAL, A. V.; REISMAN, A. The vehicle routing problem: A taxonomic review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 4, p. 1472-1483, 2009.

FAGERHOLT, K.; LINDSTAD, H. Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea. **Omega**, v. 28, n. 3, p. 269-275, 2000.

FERRO, F.; TEIXEIRA, P. **Os desafios do Pré-Sal**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2009. 78 p.

FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. **Networks**, v. 11, n. 2, p. 109-124, 1981.

FRIEDBERG, D. O.; UGLANE, V. T. **Routing and Scheduling of Platform Supply Vessels: Case from the Brazilian Petroleum Industry**. 2013. Thesis (Master in Applied Economics and Optimization) – Department of Industrial Economics and Technology Management, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway, 2013.

FUELLERER, G.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F.; IORI, M. Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem. **Computers & Operations Research,** v. 36, p. 655 – 673, 2009.

FUELLERER, G.; DOERNER, K.; HARTL, R.; IORI, M. Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 201, n. 3, p. 751-759, 2010.

FUKASAWA, R.; LONGO, H.; LYSGAARD, J.; ARAGÃO, M. P. de, REIS, M.; UCHOA, E.; WERNECK, R. F. Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. **Mathematical programming**, v. 106, n. 3, p. 491-511, 2006.

GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G. New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. **Operations Research**, v. 40, n. 6, p. 1086-1094, 1992.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SÉGUIN, R. Stochastic vehicle routing. **European Journal of Operational Research**, v. 88, n. 1, p. 3-12, 1996.

GENDREAU, M.; IORI, M.; LAPORTE, G.; MARTELLO, S. A Tabu Search Algorithm for a Routing and Container Loading Problem. **Transportation Science**, v. 40, n. 3, p. 342–350, ago. 2006.

GENDREAU, M.; IORI, M.; LAPORTE, G.; MARTELLO, S. A Tabu Search heuristic for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **Networks**, v. 51, n. 1, p. 4–18, 2008.

GUENZANI, A.; GERZELJ, E. **A Mathematical Model For The Space Allocation At A Port Yard Considering 3d Disposition Of The Cargos Linked With The Berth Allocation Problem.** 2013. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de

Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

GEORGE, J. A.; GEORGE, J. M.; LAMAR, B. W. Packing different-sized circles into a rectangular container. **European Journal of Operational Research**, v. 84, n. 3, p. 693-712, 1995.

GILLETT, B. E.; MILLER, L. R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. **Operations research**, v. 22, n. 2, p. 340-349, 1974.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

GLOVER, F. Tabu search-part I. **ORSA Journal on computing**, v. 1, n. 3, p. 190-206, 1989.

GLOVER, F. Tabu search and adaptive memory programming—advances, applications and challenges. In: **Interfaces in computer science and operations research**. Springer US, p. 1-75, 1997.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**, Rio de Janeiro: Campus, 2.ed., p. 371-408, 2005.

GOLDEN, B. L.; DEARMON, J. S.; BAKER, E. K. Computational experiments with algorithms for a class of routing problems. **Computers & Operations Research**, v. 10, n. 1, p. 47-59, 1983.

GRIBKOVSKAIA, I.; HALSKAU, Ø.; LAPORTE, G.; VLČEK, M. General solutions to the single vehicle routing problem with pickups and deliveries. **European Journal of Operational Research**, v. 180, n. 2, p. 568-584, 2007.

GRIBKOVSKAIA, I.; LAPORTE, G.; SHLOPAK, A. A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 11, p. 1449-1459, 2008.

GRÖER, C.; GOLDEN, B.; WASIL, E. "A library of local search heuristics for the vehicle routing problem". **Mathematical Programming Computation**, v. 2, p. 79-101, Abril, 2010.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K. Robust supply vessel planning. **Network Optimization**. Springer Berlin Heidelberg, p. 559-573, 2011.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K.; NONÅS, L. M.; ASBJØRNSLETT, B. E.. Optimal fleet composition and periodic routing of *offshore* supply vessels. **European Journal of Operational Research**, v. 223, p. 508–517, 2012.

HAMDI-DHAOUI, K. ; LABADIE, N.; YALAOUI, A. Problème de tournées de véhicules avec chargement bidimensionnel et contraintes de conflits partiels multi-objectif. **Proceedings of MOSIM'12**, 2012.

HENTY, F. C.; MEZA, B. M.; VIANNA, D. S.; VIANNA, M. de F. D. Um Modelo Matemático para a Programação e Roteirização de Embarcações de Apoio à Exploração de Petróleo Offshore. IN: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, 32, 2012, Bento Gonçalves (RS). **Anais**... Bento Gonçalves (RS): ABEPRO, 2012.

HOFFMANN, J. The metric-FF planning system: Translating ignoring delete lists to numerical state variables. **Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)**, v. 20, p. 291-341, 2003.

HSU, C.-W.; WAH, B.W. The sgplan planning system in ipc-6. **In: Proceedings of the Sixth Internation Planning Competition (IPC)**, 2008.

IACHAN, R. A Brazilian experience: 40 years using operations research at Petrobras. **International Transactions in Operational Research**, v. 16, n. 5, p. 585-593, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2013 (WEO 2013)**. IEA, 2013.

IORI, M. Metaheuristic algorithms for combinatorial optimization problems. **4OR**, v. 3, n. 2, p. 163-166, 2005.

IORI, M.; GONZÁLEZ, J.J. S.; VIGO, D. An exact approach for the symmetric capacitated vehicle routing problem with two dimensional loading constraints, **Technical Report OR**/03/04, DEIS, Università di Bologna, 2003.

IORI, M.; GONZÁLES, J. J. S.; VIGO, D. An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **Transportation Science**, v. 41 (2), p. 253-264, 2007.

IORI, M.; MARTELLO, S. Routing problems with loading constraints. **Top**, v. 18, n. 1, p. 4–27, 6 jul. 2010.

IORI, M.; MARTELLO, S. An annotated bibliography of combined routing and loading problems. **The Yugoslav Journal of Operations Research,** ISSN: 0354-0243 EISSN: 2334-6043, v. 23, n. 3, 2013.

JOHNSON, D. S. ; DEMERS, A. ; ULLMAN, J. D. ; GAREY, M. ; GRAHAM, R. Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms. **SIAM Journal on Computing**, v. 3, n. 4, p. 299-325, 1974.

JUAN, A., FAULIN, J., FERRER, A., LOURENÇO, H., BARRIOS, B. MIRHA: multi-start biased randomization of heuristics with adaptive local search for solving non-smooth routing problems. **Top,** v. 21, n. 1, p. 109–132, 2011a.

JUAN, A., FAULIN, J., JORBA, J., RIERA, D., MASIP, D., BARRIOS, B. On the use of Monte Carlo simulation, cache and splitting techniques to improve the Clarke and Wright saving heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 1085–1097, 2011b.

JUAN, A., FAULIN, J., RUIZ, R., BARRIOS, B., CABALLÉ, S. The SR-GCWS hybrid algorithm for solving the capacitated vehicle routing. **Applied Soft Computing**, v. 10, p. 215–224, 2010.

JUNQUEIRA, L.; OLIVEIRA, J. F.; CARRAVILLA, M.A.; MORABITO, R. An optimization model for the vehicle routing problem with practical three-dimensional loading constraints. **International Transactions in Operational Research**, v. 20, n. 5, p. 645-666, 2013.

KAISER, M. J. An integrated systems framework for service vessel forecasting in the Gulf of Mexico. **Energy**, v. 35, n. 7, p. 2777-2795, 2010.

KAISER, M. J.; SNYDER, B. An empirical analysis of offshore service vessel utilization in the US Gulf of Mexico. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 4, n. 2, p. 152-182, 2010.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of global optimization**, v. 39, n. 3, p. 459-471, 2007.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. Applied soft computing, v. 8, n. 1, p. 687-697, 2008.

KHEBBACHE-HADJI, S. ; PRINS, C.; YALAOUI, A.; REGHIOUI, M. Heuristics and memetic algorithm for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem with time windows. **Central European Journal of Operations Research**, v. 21, n. 2, p. 307-336, 2013.

KUMAR, S. N.; PANNEERSELVAM, R. A Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. **Intelligent Information Management,** v. 4, n. 3, 2012.

LABADIE, N.; PRINS, C. Vehicle Routing Nowadays: Compact Review and Emerging Problems. In: MEJÍA, G.; VELASCO, N. (Ed.). **Production systems and supply chain management in emerging countries: best practices**, Springer, p. 141-166, 2012.

LAPORTE, G. The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research,** v. 59, p. 345-358, 1992.

LAPORTE, G.; LOUVEAUX, F. V. The integer L-shaped method for stochastic integer programs with complete recourse. **Operations research letters**, v. 13, n. 3, p. 133-142, 1993.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 7, n 4-5, p. 285-300, 2000.

LAPORTE, G. Fifty years of vehicle routing. **Transportation Science**, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.

LAPORTE, G.; TOTH, P.; VIGO, D. Vehicle routing: historical perspective and recent contributions. **EURO Journal on Transportation and Logistics (EJTL).** v.2, p.1-4, 2013.

LEITE, R. P. **Maritime transporte of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvement points.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2012.

LEUNG, S. C. H.; ZHENG, J.; ZHANG, D.; ZHOU, X. Simulated annealing for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **Flexible services and manufacturing journal**, v. 22, n. 1-2, p. 61-82, 2010.

LEUNG, S. C. H.; ZHOU, X.; ZHANG, D.; ZHENG, J. Extended guided tabu search and a new packing algorithm for the two-dimensional loading vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 38, p. 205 – 215, 2011.

LEUNG, S. C. H.; ZHANG, Z..; ZHANG, D.; HUA, X.; LIM, M. K. A meta-heuristic algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with two-dimensional loading constraints. **European Journal of Operational Research,** v. 225, p. 199–210, 2013.

LI, F. **Modeling and Solving Variants of the Vehicle Routing Problem: Algorithms, Test Problems, and Computational Results.** Thesis (Doctor of Philosophy), Applied Mathematics and Scientific Computation, University of Maryland, College Park, USA, 2005.

LI, F.; GOLDEN, B.; WASIL, E. "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem". **Computers & Operations Research**, v. 34,p. 2734-2742, 2007.

LOPES, P. H. M. **Uma Solução para o Problema de Roteamento de Embarcações de Apoio "Offshore" através da Meta-heurística RTR.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LODI, A.; MARTELLO, S.; VIGO, D. Heuristic and metaheuristic approaches for a class of two-dimensional bin packing problems. **INFORMS Journal on Computing**, v. 11, n. 4, p. 345-357, 1999.

MAISIUK, Y.; GRIBKOVSKAIA, I. Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times. **Procedia Computer Science**, v. 31, p. 939-948, 2014.

MALAPERT, A.; GUERET, C.; JUSSIEN, N.; LANGEVIN, A.; ROUSSEAU, L.-M. Two-dimensional pickup and delivery routing problem with loading constraints. **In**: **Proceedings of the First CPAIOR Workshop on Bin Packing and Placement Constraints (BPPC'08),** Paris, France, 2008.

MAPA, S. M. S. **Localização-alocação de instalações com Sistema de Informações Geográficas e modelagem matemática**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

MARTELLO, S.; VIGO, D. Exact solution of the two-dimensional finite bin packing problem. **Management science**, v. 44, n. 3, p. 388-399, 1998.

MARTELLO, S.; PISINGER, D.; VIGO, D. The three-dimensional bin packing problem. **Operations Research**, v. 48, n. 2, p. 256-267, 2000.

MARTELLO, S.; PISINGER D.; VIGO D.; DEN BOEF D.; KORST J. Algorithm 864: General and robot-packable variants of the three-dimensional bin packing problem. **ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)**, v. 33, n. 1, p. 7, 2007.

MARTÍNEZ, L.; AMAYA, C. A. A vehicle routing problem with multi-trips and time windows for circular items. **Journal of the Operational Research Society**, v. 64, n. 11, p. 1630-1643, 2013.

MASSEN, F.; DEVILLE, Y.; VAN HENTENRYCK, P. Pheromone-based heuristic column generation for vehicle routing problems with black box feasibility. In**: Proceeding of the International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems (CPAIOR)**. Springer Berlin Heidelberg, p. 260-274, 2012.

MENDES, A. B. **Programação de Frota de Apoio a Operações "Offshore" sujeita à requisição de Múltiplas Embarcações para uma mesma Tarefa.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

METAHEURISTICS NETWORK. Disponível em: http://www.metaheuristics.net. Acesso em: 20 de janeiro de 2015.

MOURA, A. A multi-objective genetic algorithm for the vehicle routing with time windows and loading problem. In: BORTFELDT, A.; HOMBERGER, J.; KOPFER, H.; PANKRATZ, G.; STRANGMEIER, R. **Intelligent Decision Support**. Gabler, p. 187-201, 2008.

MOURA, A.; OLIVEIRA, J. F. An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems. **OR spectrum**, v. 31, n. 4, p. 775-800, 2009.

MUÑOZ, A. L. **Solución al problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y reordenamiento de carga en los sitios de demanda**. 2011. 84 f. Tesis (Magister en Ciencias de la Ingeniería) - Escuela de Ingenieria, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Chile, 2011.

MUYLDERMANS, L.; PANG, G. A guided local search procedure for the multi-compartment capacitated arc routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 9, p. 1662-1673, 2010.

NADDEF, D., G. RINALDI. Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP. P. Toth, D. Vigo, eds. **The Vehicle Routing Problem**. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, PA, p. 53–84, 2002.

NORLUND, E. K.; GRIBKOVSKAIA, I. Reducing emissions through speed optimization in supply vessel operations. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 23, p. 105-113, 2013.

NOVAES, A. G. **Sistemas Logísticos: Transporte, Armazenagem e Distribuição Física de Produtos**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1989. 372 p.

NOVAES, A. G**. Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribui'ção: Estratégia, Operação e Avaliação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 400 p.

PANAMARENKA, K.. **Minimization of emissions in periodic supply vessel planning through speed optimization.** 2011. Thesis (Master in Logistics) – Molde University College, Norway, 2011.

PARTYKA, J. G.; HALL, R. W. On the road to service. **OR/MS Today**, v. 27, n. 4, p. 26-30, 2000.

PISINGER D.; SIGURD M. On using decomposition techniques and constraint programming for solving the two-dimensional bin packing problem. **Technical Report**, Department of Computer Science, University of Copenhagen, 2003.

POLLARIS, H.; BRAEKERS, K., CARIS, A., JANSSENS, G. K., LIMBOURG, S. Vehicle routing problems with loading constraints: state-of-the-art and future directions. **OR Spectrum**, v.37. p. 297-330, 2015.

POTVIN, J.-Y.; ROUSSEAU, J.-M. An exchange heuristic for routing problems with time windows. **Journal of the Operational Research Society**, v. 46, n. 12, p. 1433-1446, 1995.

RANCK JÚNIOR, R.; YANASSE, H. H. O Problema Integrado de Carregamento e Roteamento de Veículos: uma revisão parcial dos trabalhos da literatura. **In: X Worcap.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE: São José dos Campos, 2010.

RIBEIRO, L. S.; IACHAN, R. Dimensionamento da Frota de Supridores para Plataformas de Petróleo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41, 2009, Salvador. **Anais** ... Salvador: SOBRAPO, 2009.

SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, A.; ALVES, T. W. Demanda e Oferta Energética: Uma Perspectiva Mundial e Nacional para o Etanol. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 16, n. 16, p. 3167-3186, 2013.

SHEN, Y.; MURATA, T. Pick-up Scheduling of Two-dimensional Loading in Vehicle Routing Problem by using GA. **In: Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS**, v. 2, p. 1532-1537, Hong Kong, 2012.

SHYSHOU, A.; FAGERHOLT, K.; GRIBKOVSKAIA, I.; LAPORTE, G. A large neighbourhood search heuristic for a periodic supply vessel planning problem arising in offshore oil and gas operations. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 50, n. 4, p. 195-204, 2012.

SILVA, E. L. da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 4. ed., Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.

SOPOT, E.; GRIBKOVSKAIA, I. Routing of Supply Vessels to with Deliveries and Pickups of Multiple Commodities. **Procedia Computer Science**, v. 31, p. 910-917, 2014.

SOBREIRA, R. Logística Offshore E&P: Uma Operação de Guerra. **In: Offshore Technology Conference (OTC)**. Brasil, 2013.

STRODL, J.; DOERNER, K.F.; TRICOIRE, F.; HARTL, R.F. On index structures in hybrid metaheuristics for routing problems with hard feasibility checks: An application to the 2-dimensional loading vehicle routing problem. In: BLESA, M.J.; BLUM, C.; RAIDL, G.; ROLI, A.; SAMPELS, M. **Hybrid Metaheuristics**, v. 6373 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 160-173, Springer Berlin Heidelberg, 2010.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations research**, v. 35, n. 2, p. 254-265, 1987.

TARANTILIS, C. D.; ZACHARIADIS, E. E.; KIRANOUDIS, C. T. A hybrid metaheuristic algorithm for the integrated vehicle routing and three-dimensional container-loading problem. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 2, p. 255-271, 2009.

TOTH, P.; VIGO, D. Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. **Discrete Applied Mathematics**, v. 123, n. 1, p. 487-512, 2002a.

TOTH, P., D. VIGO. **The Vehicle Routing Problem.** Monographs on Discrete Mathematics and Applications (SIAM), Philadelphia, 2002b.

TRICOIRE, F.; Doerner, K.; Hartl, R.; Iori, M. Heuristic and exact algorithms for the multi-pile vehicle routing problem. **OR spectrum**, v. 33, n. 4, p. 931-959, 2011.

VAQUERO, T. S.; COSTA, G.; TONIDANDEL, F.; IGREJA, H.; SILVA, J. R.; BECK, C. Planning and Scheduling Ship Operations on Petroleum Ports and Platforms. In: **Proceedings of the Scheduling and Planning Applications Workshop**. p. 8-16, 2012.

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

VIANNA, D. S. ; MEZA, E. B. M.; HENTZY, F. C.; MARTINS, C. B.; MEDEIROS, A. P. de. Heurísticas Baseadas em Busca Local para a Programação e Roterização de Embarcações de Apoio à Exploração de Petróleo Offshore, Analisando Múltiplas Estruturas de Vizinhança. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 44, 2012, Rio de janeiro. **Anais** ... Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2012.

ZACHARIADIS, E. E.; KIRANOUDIS, C. T.; TARANTILIS, C. D. A Guided Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with two-dimensional loading constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 195, n. 3, p. 729–743, jun. 2009.

ZACHARIADIS, E. E.; TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. Integrated distribution and loading planning via a compact metaheuristic algorithm. **European Journal of Operational Research**, v. 228, p. 56–71, 2013.

WANG, F.; TAO, Y.; SHI, N. A survey on vehicle routing problem with loading constraints. In: **Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on.** IEEE, p. 602-606, 2009.

WÄSCHER, G.; HAUßNER, H.; SCHUMANN, H. An improved typology of cutting and packing problems**. European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 3, p. 1109-1130, 2007.

WEI, L., ZHANG, Z., ZHANG, D., LIM, A. A variable neighborhood search for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n.3, p. 798-814, 2015.