

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO PARA A ROTEIRIZAÇÃO E
PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS: UM ESTUDO DE CASO NA
INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

VINÍCIUS PICANÇO RODRIGUES

São Carlos

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UMA ABORDAGEM DE OTIMIZAÇÃO PARA A ROTEIRIZAÇÃO E
PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS: UM ESTUDO DE CASO NA
INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

VINÍCIUS PICANÇO RODRIGUES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof.Dr.Reinaldo Morabito

São Carlos

2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R696ao Rodrigues, Vinícius Picanço.
Uma abordagem de otimização para a roteirização e programação de navios : um estudo de caso na indústria petrolífera / Vinícius Picanço Rodrigues. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
157 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Problema de roteirização de veículos. 2. Programação de veículos. 3. Transporte marítimo. 4. Petróleo. 5. Métodos heurísticos. I. Título.

CDD: 658.5 (20^a)

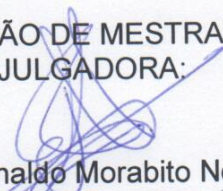


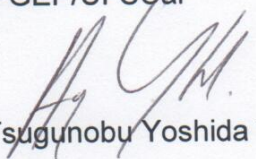
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Rod. Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil
Fone/Fax: (016) 3351-8236 / 3351-8237 / 3351-8238 (ramal: 232)
Email : ppgep@dep.ufscar.br


FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Vinícius Picanço Rodrigues

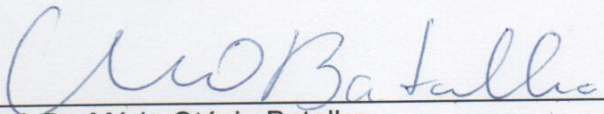
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 26/05/2014 PELA
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki
EP/USP


Dr. Paulo Cesar Ribas
CENPES/PDAB/DLT/PETROBRAS


Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto
PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE

Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE



Aos meus pais, José e Maristela, e meu tio Amilton, que foram os maiores gigantes nos quais eu poderia me apoiar em qualquer situação da minha vida, e a todos aqueles que genuinamente trabalham para construir um mundo mais “otimizado”.

“If I have seen further, it is by standing upon the shoulders of giants”

Sir Isaac Newton (1642-1727)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Reinaldo Morabito, por transcender o papel de orientador e por ser um profissional brilhante e íntegro, em quem nunca deixarei de me espelhar ao longo da minha carreira.

Aos meus pais, José e Maristela, por nunca terem deixado o brilho no meu olho se apagar e por me incentivar e preparar para as maiores experiências da minha vida.

À Amanda, pelo carinho fora do comum e pelo companheirismo que conforta, ensina e me transforma a cada dia. Eu não poderia ter alguém melhor ao meu lado.

Ao Paulo, Jonas e Gustavo, que permitiram que este trabalho fosse executado de maneira diferenciada ao proporcionar conhecimento prático extremamente rico e minucioso.

Ao Prof.Dr.Hugo Yoshizaki, da POLI/USP, pela grande contribuição dada no meu exame de qualificação e pelas discussões inspiradoras que tivemos em Cambridge.

Ao Prof.Dr.Roberto Tavares, Prof.Dr^a.Vitória Pureza e Dr^a. Denise Yamashita, do DEP/UFSCar, que me acompanharam ao longo de toda a execução deste trabalho, apoiando todas as minhas atividades de uma maneira fundamental e sugerindo caminhos extremamente poderosos e construtivos.

Ao Prof.Dr.Eduardo Zancul, da POLI/USP, em quem há muitos anos me inspiro como grande exemplo de carreira e de professor. Agradeço todas as oportunidades que compartilhamos e os suportes precisos em momento delicados de decisão profissional e pessoal.

Aos amigos e companheiros de trabalho Bruno, Gabriela, Amélia, Cleber e Leonardo, por me permitirem aprender muito com a experiência e conhecimento de vocês e sempre estarem dispostos a discutir, pensar, programar e varar algumas manhãs, tardes e noites juntos.

A todos os meus amigos, em especial Vitor, Felipe, Ricardo e Gabriel (meu sempre sócios), Roque, Douglas, Rodrigo, Mirela, Daniela, Janaína, Victor, Raquel, Luciana e Wanda, por terem me apoiado incondicionalmente durante esses mais de dois anos de dedicação ao trabalho, entendendo minhas limitações e demonstrando preocupação genuína com todo o meu desenvolvimento.

A todos os meus professores e funcionários do DEP/UFSCar, pelo sempre generoso suporte, dedicação e as muitas horas de extremo aprendizado e experiência.

Ao Dr.Roberto Perez-Franco, Dr.Edgar Blanco e Daniel Merchan, do MIT (EUA), por me ensinarem como trabalhar em um dos ambientes mais inovadores e inspiradores do mundo.

RESUMO

Este trabalho estuda o problema de roteirização e programação de navios que realizam o escoamento de petróleo das plataformas marítimas para terminais terrestres, motivado por uma situação real de uma empresa brasileira da indústria petrolífera. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de petróleo, e cerca de 80% de seu petróleo é explorado no mar. Dentro deste contexto, os custos de transporte desempenham um papel importante na busca pela excelência operacional e as tendências de crescimento da exploração de petróleo no Brasil têm tornado as operações mais complexas e demandantes de sistemas de apoio à decisão ágeis e eficazes que contemplem o dinamismo do setor petrolífero. O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver e aplicar uma abordagem de otimização baseada em um modelo de programação linear inteira mista em situações reais de tomada de decisão, em conjunto com métodos de solução baseados em programação matemática (*MIP-Heuristics*) para resolver o modelo, como *relax-and-fix*. O modelo proposto é inspirado em uma formulação de problemas de coleta e entrega com janelas de tempo (*pickup and delivery with time windows* – PDPTW) e frota heterogênea, no qual busca-se minimizar os custos decorrentes do consumo de combustível dos navios e contratos de afretamento. O modelo é do tipo *origem-destino*, no qual os pares coleta/entrega são pré-determinados e a decisão do modelo refere-se à alocação de navios para os diferentes pares, compondo uma rota. Além disso, são propostas restrições adicionais que contemplam limitações de acesso a terminais e de atracação em plataformas de acordo com os tipos de navio, além da incompatibilidade de mistura de produtos, entre outros. O modelo foi implementado utilizando uma linguagem de modelagem em conjunto com um *software* de otimização. Experimentos computacionais com o modelo e as heurísticas são apresentados para diferentes conjuntos de dados fornecidos pela empresa e comprovam o potencial das abordagens para encontrar boas soluções para o problema, mas também suas dificuldades para encontrar soluções para exemplares de tamanho realista, por tratar-se de um problema *NP-difícil* do ponto de vista de teoria de complexidade.

Palavras-chave: roteirização e programação de veículos; coleta e entrega; transporte marítimo; petróleo; heurísticas baseadas em programação matemática.

ABSTRACT

This work studies the ship routing and scheduling problem in oil transportation from offshore platforms to inland terminals. It is motivated by a real situation in a Brazilian oil company. Brazil is one of the world's greatest oil producers and has around 80% of its oil explored in offshore mode. Thus, transportation costs play an important role in achieving operational excellence, and the recent growth trends for oil exploration in Brazil has transformed its operations and demanded agile and effective decision support systems for addressing the oil sector dynamism. This work's goal consists in developing and applying an optimization-based approach using a mixed integer linear programming model in real decision-making situations, along with a solution method based on mathematical programming (MIP-heuristics) in order to solve the model, such as relax-and-fix. The proposed model is inspired in a problem formulation for pickup and delivery with time windows (PDPTW) and heterogeneous fleet, where costs incurred for fuel consumption and fleet contracts is the objective function to be minimized. The pickup and delivery pairs are predetermined and the model's main decision refers to ship allocation to these pairs compounding a route. Furthermore, some additional constraints are modeled and proposed, such as terminal access and platform mooring limitation according to ship types, as well as product blend incompatibility. The model was implemented in a modeling language along with an optimization software. Computational experiments with the model and the heuristics are presented for different data sets supplied by the case study company. These experiments show the potential benefits of this approach for finding good solutions for the problem as well as the difficulty in finding solutions for realistic instances due to its NP-hard characteristics.

Keywords: vehicle routing and scheduling (VRP); pickup and delivery; maritime transportation; oil; MIP-Heuristics;

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE QUADROS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	3
1.2 OBJETIVOS	3
<i>1.2.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>4</i>
1.3 JUSTIFICATIVA	4
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA	5
<i>1.4.1 Abordagem de Pesquisa</i>	<i>6</i>
<i>1.4.2 Método de Pesquisa.....</i>	<i>7</i>
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 CADEIA PRODUTIVA DO PETRÓLEO.....	10
<i>2.1.1 Características gerais</i>	<i>10</i>
<i>2.1.2 Prospecção</i>	<i>11</i>
<i>2.1.3 Perfuração.....</i>	<i>12</i>
<i>2.1.4 Transporte</i>	<i>12</i>
<i>2.1.5 Produção</i>	<i>12</i>
2.2 TRANSPORTE MARÍTIMO.....	14
2.3 MODELOS DE ROTEIRIZAÇÃO	16
<i>2.3.1 Conceitos e definições básicas em grafos</i>	<i>17</i>
<i>2.3.2 Problema do Caixeiro Viajante (Traveling Salesman Problem)</i>	<i>20</i>
<i>2.3.3 Problema de Roteirização de Veículos (Vehicle Routing Problem).....</i>	<i>21</i>
<i>2.3.4 Problema de Coleta e Entrega (Pick-up and Delivery Problem).....</i>	<i>26</i>
2.4 MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	30
<i>2.4.1 Heurísticas clássicas</i>	<i>31</i>
<i>2.4.2 Heurísticas baseadas em programação matemática (MIP-Heuristics)</i>	<i>33</i>
2.5 MODELOS DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS APLICADOS AO TRANSPORTE MARÍTIMO	38

3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA	53
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA DO ESTUDO DE CASO	53
3.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ESCOAMENTO DE PETRÓLEO <i>OFFSHORE</i>.....	55
3.2.1	<i>Produto</i>	57
3.2.2	<i>Frota</i>	57
3.2.3	<i>Plataformas</i>	60
3.2.4	<i>Terminais</i>	63
3.2.5	<i>Demanda</i>	65
3.2.6	<i>Principais dados de entrada</i>	66
3.3	MODELAGEM MATEMÁTICA	67
3.3.1	<i>Restrições adicionais para representar posicionamento dinâmico e limitação de carga a bordo do navio</i>	76
3.3.2	<i>Restrições adicionais para representar incompatibilidade entre produtos</i>	79
3.3.3	<i>Fixação de variáveis para eliminar arcos inexistentes da rede</i>	80
3.3.4	<i>Regras práticas de operação</i>	83
3.3.5	<i>Incorporação dos custos de combustível e penalização por atracações consecutivas na função objetivo</i>	84
4	EXPERIMENTOS COM MODELO E RESULTADOS COMPUTACIONAIS	88
4.1	<i>TOY MODELS</i>.....	89
4.2	EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS	98
4.2.1	<i>Conjunto de dados 1</i>	99
4.2.2	<i>Conjunto de dados 2</i>	103
4.2.3	<i>Conjunto de dados 3</i>	106
4.2.4	<i>Testes com parâmetros alternativos do solver</i>	108
5	MÉTODOS HEURÍSTICOS DE SOLUÇÃO.....	110
5.1	ESTRATÉGIA I.....	110
5.1.1	<i>Resultados computacionais e ajustes na heurística</i>	112
5.2	ESTRATÉGIA II.....	118
5.2.1	<i>Resultados computacionais</i>	120
6	CONCLUSÕES.....	122
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA PARA O EXEMPLAR N6 DO CONJUNTO DE DADOS 1.....	136
APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA PARA O EXEMPLAR N16 COM $K = 10$ DO CONJUNTO DE DADOS 2	142
APÊNDICE C – CÓDIGO DO <i>RELAX-AND-FIX</i> EM GAMS PARA ESTRATÉGIA I	147
APÊNDICE D – PSEUDOCÓDIGO DO <i>RELAX-AND-FIX</i> PARA ESTRATÉGIA II	150
APÊNDICE E – CÓDIGO DO <i>RELAX-AND-FIX</i> EM GAMS PARA ESTRATÉGIA II	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Indutivismo e dedutivismo combinados.	6
Figura 1.2 – Processo de modelagem em Pesquisa Operacional.....	7
Figura 2.1 – Etapas produtivas do processo de refino de petróleo. Fonte: Adaptado de Davoglio et al. (2011) e Shreve e Brink (1980).	14
Figura 2.2 – (a) Exemplo de grafo direcionado. (b) Exemplo de grafo não direcionado.....	18
Figura 2.3 – Exemplos de passeios em grafos.....	19
Figura 2.4 – Exemplo esquemático de um TSP.....	20
Figura 2.5 – Exemplo esquemático de um VRP.....	22
Figura 2.6 – Exemplo esquemático de PDP.	27
Figura 2.7 – Exemplo de procedimento da heurística de Clarke e Wright.....	31
Figura 3.1 – Ilustração da cadeia de suprimentos do petróleo da Petrobras.....	55
Figura 3.2 – Estrutura hierárquica do planejamento da cadeia de suprimentos do petróleo.	56
Figura 3.3 – Ilustração de um navio petroleiro com as respectivas marcações de LOA e calado.	59
Figura 3.4 – Navios Recife Knutsen (esquerda) e Stena Spirit (direita) atracados no terminal de São Sebastião, no litoral norte de São Paulo.	60
Figura 3.5 – Plataforma fixa Garoupa 1 na bacia de Campos.	61
Figura 3.6 – Navio de produção P-32 em operação no campo de Marlim.....	61
Figura 3.7 – Navio-sonda NS-16 operando no campo de Congro.....	62
Figura 3.8 – Plataforma P-40 operando no campo de Marlim Sul.....	63
Figura 3.9 – Plataforma PA-6 operando no campo de Garoupa.....	63
Figura 3.10 – Detalhe de dois navios ocupando dois berços em um terminal portuário de Paranaguá-PR.	64
Figura 3.11 – Terminal localizado no estado do Rio de Janeiro.	65

Figura 3.12 - Representação esquemática da estratégia de replicação de nós e depósitos artificiais adotada na modelagem do problema.	69
Figura 3.13 – Representação esquemática da relação entre os instantes de início de serviço nos nós i e j , os tempos de serviço no nó e os tempos de deslocamento.	75
Figura 3.14 – Representação das restrições de balanço de carga para o navio k	75
Figura 4.1 – Visão resumida dos conjuntos de dados para os experimentos computacionais .	88
Figura 4.2 – Ilustração da estrutura de rede para os casos dos testes de 1 a 7.	90
Figura 4.3 - Ilustração da estrutura de rede para os casos dos testes de 8 a 11.	90
Figura 4.4 – Resultado gráfico do teste 1.	92
Figura 4.5 - Resultado gráfico do teste 2.	92
Figura 4.6 - Resultado gráfico do teste 3.	93
Figura 4.7 - Resultado gráfico do teste 4.	94
Figura 4.8 - Resultado gráfico do teste 5.	94
Figura 4.9 - Resultado gráfico do teste 6.	95
Figura 4.10 - Resultado gráfico do teste 8.	96
Figura 4.11 - Resultado gráfico do teste 10.	97
Figura 4.12 - Resultado gráfico do teste 11.	98
Figura 4.13 – Representação esquemática da solução do exemplar N6, que utilizou apenas o navio A.	101
Figura 4.14 – Representação esquemática da solução do exemplar N12, que utilizou 3 navios onde (a) representa a rota do navio A; (b) a rota do navio B e (c) a rota do navio C.	102
Figura 4.15 - Representação esquemática da solução do exemplar N16 com $ K =10$, que utilizou 7 navios onde (a) representa a rota do navio A; (b) a rota do navio B; (c) a rota do navio C; (d) a rota do navio D; (e) a rota do navio E; (f) a rota do navio F; (g) a rota do navio G.	105
Figura 4.16 – Curva de solução do exemplar N22_CONJ3_FX.	108
Figura 5.1 – Esquema ilustrativo do funcionamento da heurística <i>relax-and-fix</i> com duas iterações.	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Classificação de uma empresa típica do setor petrolífero segundo a metodologia de MacCarthy e Fernandes (2000).....	10
Quadro 2.2 - Resumo dos principais trabalhos da literatura para roteirização aplicada ao modal marítimo.....	50
Quadro 3.1 – Listagem das 10 maiores empresas de energia do mundo, em valor de mercado.	53
Quadro 3.2 – Principais indicadores da Petrobras.....	54
Quadro 3.3 – Capacidade dos navios de acordo com sua classe.	58
Quadro 3.4 – Limite máximo de carga permitido para atracação, de acordo com o tipo de plataforma e navio.	77
Quadro 4.1 – Principais características dos casos de teste para implementação dos <i>toy models</i>	91
Quadro 4.2 – Resultados computacionais do conjunto de dados 1 para os exemplares de N6 a N48.	100
Quadro 4.3 - Resultados comparativos entre os exemplares N18, N20, N24 e N36 para $ K =33$ e $ K =15$	103
Quadro 4.4 - Resultados comparativos entre os exemplares N12, N16, N22 para diferentes valores de $ K $	104
Quadro 4.5 – Resultados dos exemplares N11 para diferentes intervalos de tempo.....	106
Quadro 4.6 – Resultados dos exemplares testados para o conjunto de dados 3, sem a inclusão das fixações.....	107
Quadro 4.7 - Resultados dos exemplares testados para o conjunto de dados 3, com a inclusão das fixações.....	107
Quadro 5.1 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística <i>relax-and-fix</i> , utilizando a ordenação alfabética de navios (i.e, sem ordenação).....	114

Quadro 5.2 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística <i>relax-and-fix</i> , utilizando a ordenação crescente por consumo (custo) do navio.	115
Quadro 5.3 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística <i>relax-and-fix</i> , utilizando a ordenação crescente por capacidade do navio.	116
Quadro 5.4 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística <i>relax-and-fix</i> , utilizando a ordenação decrescente por capacidade do navio.	116
Quadro 5.5 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística <i>relax-and-fix</i> , utilizando a ordenação crescente da razão entre consumo e capacidade do navio.	117
Quadro 5.6 – Resultados computacionais da estratégia II da heurística <i>relax-and-fix</i>	120
Quadro 8.1 - Dados de janela de tempo inferior a_i , superior b_i , em horas, e quantidade de carga d_i , em m^3 , ser coletada ou entregue por nó para o conjunto de dados 1.	136
Quadro 8.2 - Dados de capacidade máxima Cap_k , em m^3 velocidade v_k , em nós, por navio para o conjunto de dados 1.	138
Quadro 8.3 - Distância $dist_{ij}$ entre os nós, em milhas náuticas, para o conjunto de dados 1.	139
Quadro 8.4 - Representação de incompatibilidade de atracação de navios em pontos operacionais para o conjunto de dados 1.	140
Quadro 8.5 - Tempos de serviço ts_{ik} no ponto operacional (PO) i , em horas, atendido pelo navio k para o conjunto de dados 1.	141
Quadro 8.6 - Dados de janela de tempo inferior a_i , superior b_i , em horas, e quantidade de carga d_i , em m^3 , a ser coletada ou entregue por nó e vetor de posicionamento dinâmico C_{DP} para o conjunto de dados 2.	142
Quadro 8.7 - Dados de capacidade máxima Cap_k , em m^3 , velocidade v_k , em nós, e vetor de posicionamento dinâmico K_{DP} por navio para o conjunto de dados 2.	143
Quadro 8.8 - Distância $dist_{ij}$ entre os nós, em milhas náuticas, para o conjunto de dados 2.	144
Quadro 8.9 - Representação de incompatibilidade de atracação de navios em pontos operacionais para o conjunto de dados 2.	145

Quadro 8.10 - Tempos de serviço $t_{s_{ik}}$ no ponto operacional (PO) i , em horas, atendido pelo navio k para o conjunto de dados 2.....	146
Quadro 8.11 – Valores de α_1^{jk} que determinam a flexibilização de atracação para o conjunto de dados 2.....	146

1 INTRODUÇÃO

À medida que a economia mundial torna-se cada vez mais globalizada, os serviços de transporte de produtos passam a representar uma parcela maior dos custos das empresas, configurando-se como uma importante fonte de atuação para alcançar a eficiência operacional. Dentro deste contexto, o transporte marítimo é um importante modal de transporte, principalmente no que se refere à movimentação de grandes volumes de carga entre grandes distâncias como, por exemplo, cabotagem no Brasil e operações de importação e exportação. Somente em 2012, aproximadamente 8,7 bilhões de toneladas de produtos foram transportados pelos oceanos do mundo, o que faz com que o transporte marítimo seja responsável por cerca de 80% do volume e 70% do valor de mercadorias comercializadas mundialmente. Deste total de carga transportado por navios, aproximadamente 2,8 bilhões de toneladas, ou 32%, correspondem a petróleo e gás. Além disso, a frota mundial de navios cresceu 37% em apenas 4 anos (UNCTAD, 2012; DIZ, 2012).

O Brasil é um país que apresenta grande extensão territorial e possui seus principais parceiros comerciais, tais como Estados Unidos, Europa e China, distantes geograficamente. Portanto, o transporte marítimo tem um papel muito importante para o seu desempenho comercial, cenário no qual mais de 80% das exportações acontecem por meio dos portos brasileiros. Além disso, devido ao estímulo à comercialização de derivados de petróleo e às descobertas de novas fontes de exploração, o setor petrolífero brasileiro enfrenta um considerável aumento em sua competitividade e, por consequência, as empresas do setor passaram a buscar maior agilidade na tomada de decisões e elaborar estratégias para organizar suas atividades com vistas a um melhor resultado econômico. (PUCU, 2011; PETROBRAS, 2014a,b,d).

Em geral, é comum separar as decisões em transporte marítimo em três níveis com seus respectivos objetos (CHRISTIANSEN et al., 2007):

- a) *decisões estratégicas* são de longo prazo e englobam as seleções comerciais e de mercado, especificação e projeto de navio, projeto do sistema de transporte e redes, e tamanho da frota e dos terminais;

b) *decisões táticas*, de médio prazo, na qual encontram-se decisões sobre roteirização e programação (*scheduling*), alocação de berços e guindastes nos portos e planejamento e gestão dos contêineres. Note que o *scheduling* pode ser considerado tático no transporte marítimo pois envolve decisões com horizonte de tempo de várias semanas ou meses, como é o caso das operações de importação e exportação, cujas viagens podem ser extremamente longas, Em manufatura, por exemplo, *scheduling* encontra-se apenas na esfera operacional;

c) *decisões operacionais*, de curto prazo, contemplam a seleção da velocidade de cruzeiro, carregamento do navio (tempos de espera), roteirização e programação (*scheduling*), incluindo problemas com restrições meteorológicas.

É possível posicionar as temáticas de roteirização e programação de navios tanto na esfera tática (b) quanto operacional (c). A principal diferença que justifica a diferenciação de classificação é o impacto, em termos de tempo, que as decisões apresentam. Dentro do contexto tático, estão as decisões sobre viagens internacionais que duram várias semanas e impactam o planejamento da produção em alguns meses. Já nas decisões operacionais, as unidades de tempo para a tomada decisão são dadas em dias e horas e apresentam um impacto temporalmente reduzido no horizonte de tempo de planejamento. Este projeto está alocado dentro do escopo operacional, de dias ou poucas semanas, uma vez que a unidade de análise é o transporte específico que é realizado entre plataformas de exploração marítima de petróleo e terminais portuários. Portanto, a dinâmica de decisões é rápida e alinhada com as necessidades imediatas de produção das refinarias (HENNIG et al., 2012).

Por ser um mercado altamente dinâmico, o setor petrolífero exige decisões versáteis por parte das refinarias, principalmente no que se refere às decisões operacionais, segundo Christiansen et al. (2007) e Hennig et al. (2012). Isto, por sua vez, demanda um processo de apoio à decisão ágil e que seja capaz de fornecer resultados de boa qualidade em tempo adequado à dinâmica de decisões das empresas. Um dos recursos que pode atender a estes requisitos é a formulação de modelos matemáticos, com o desenvolvimento e aplicação de métodos de solução e suas incorporações em sistemas computacionais que apoiam a tomada de decisão.

Neste trabalho, pretende-se desenvolver e aplicar modelos de programação matemática que representem e se adaptem à natureza do problema de roteirização dentro do contexto de modal marítimo, de maneira alinhada aos requisitos de negócio e especificidades

do ambiente da empresa. Para resolver os modelos, pretende-se utilizar *softwares* de otimização e heurísticas baseadas em programação matemática (*MIP heuristics*), como *relax-and-fix*, que atende aos requisitos mencionados anteriormente de sistemas ágeis que sejam capazes de suportar a tomada de decisão em conjunto com sistemas computacionais corporativos já estabelecidos.

1.1 Problema de Pesquisa

O problema que motiva e norteia este trabalho é roteirizar e programar os navios que realizam o escoamento de petróleo das plataformas *offshore*¹ para os terminais terrestres de uma empresa petrolífera, face ao prognóstico de aumento de produção e complexidade do sistema de distribuição. A motivação desta pesquisa é o problema que surge dentro do contexto brasileiro, no caso a empresa Petrobras. Assim, este problema pode ser diretamente traduzido nas perguntas de pesquisa: *qual é o modelo matemático de suporte à decisão que melhor representa este problema de roteirização e programação de navios, dadas as restrições operacionais do negócio e a necessidade de tomada ágil de decisão? Como resolver este problema para obter soluções úteis em situações práticas?*

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho podem ser divididos em suas componentes gerais e específicas, a partir das perguntas de pesquisa propostas.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo matemático de suporte a decisões operacionais para o problema de roteirização e programação de navios no transporte de petróleo das plataformas *offshore* para os terminais portuários de uma empresa petrolífera, e pesquisar métodos exatos e heurísticos, baseados em programação linear inteira mista de solução para resolvê-lo.

¹ Termo comumente utilizado na indústria de petróleo para designar a exploração e produção que são realizadas no oceano.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser definidos da seguinte maneira:

- a) aplicar o modelo de programação inteira mista (*mixed integer programming* - MIP) resultante em situações reais de tomada de decisão para avaliar o desempenho computacional e a qualidade da solução fornecida;
- b) desenvolver e aplicar métodos de solução com heurísticas baseadas em programação matemática (*MIP-Heuristics*) para conferir maior desempenho computacional ao modelo;
- c) analisar o funcionamento do modelo e dos respectivos métodos heurísticos desenvolvidos com base na estrutura dos sistemas de apoio à decisão já utilizados pela empresa em situações reais.

1.3 **Justificativa**

O Brasil é atualmente o nono maior produtor mundial de petróleo, com uma produção diária de cerca de 2,5 milhões de barris, que corresponde a 3% do mercado global. Além disso, suas reservas estimadas ultrapassam os 12 bilhões de barris e colocam o país na décima quinta posição global. Já as atividades de importação e exportação de petróleo no Brasil não são expressivas, uma vez que o país tem a maior parte de sua produção destinada ao consumo autossuficiente interno. A maior parte do petróleo brasileiro é explorado na modalidade *offshore* - dos 256 poços de exploração de petróleo que operam atualmente, 132 localizam-se no mar e correspondem a 80% do volume explorado pelo Brasil (ANP, 2012; IEA, 2013).

Até o ano de 2011 o Brasil possuía 113 plataformas de exploração de petróleo, sendo 79 fixas e 34 flutuantes. O petróleo proveniente das plataformas é transportado majoritariamente por navios para os terminais das refinarias, onde ele é processado e refinado. Grande parte do custo operacional de produção de derivados do petróleo é devido às operações de transporte (PUCU, 2011). Dessa forma, decisões sobre a frota de navios são importantes para manter a operação das empresas produtoras de petróleo e derivados consistente com as demandas de negócios. Segundo Petrobras (2014a), a frota atual da

companhia ultrapassa as 250 unidades, podendo ser composta por unidades terceirizadas, dependendo das condições da frota e das necessidades de escoamento de petróleo.

Outro fator de destaque que reforça as justificativas para a execução desta pesquisa é a exploração da camada pré-sal, que é um conjunto de rochas localizadas em águas muito profundas² de grande parte do litoral brasileiro e que apresenta um grande potencial para exploração de petróleo. Atualmente, a Petrobras produz diariamente 470 mil barris de petróleo vindos desta região e a estimativa é que a produção alcance 1 milhão de barris por dia em 2017. Além disso, a companhia investirá US\$70 bilhões na exploração do pré-sal até 2016, dos quais 85% serão realizados na Bacia de Santos. Se o valor for somado ao investido por parceiros da Petrobras, o total de previsão de investimentos atinge a casa dos US\$ 93 bilhões (PETROBRAS, 2014d).

Dessa forma, diante do alto dinamismo característico da indústria petroleira, o alto impacto das decisões e custos de transporte e as grandes perspectivas de aumento de produção e investimentos em exploração de petróleo, tornam-se necessárias abordagens e métodos refinados que incorporem sistemas de apoio à decisão ágeis e alinhados com a dinâmica do negócio no qual ele se insere. Em particular, modelos de otimização baseados em programação matemática e métodos heurísticos para tratá-los podem configurar-se como uma contribuição importante para essas abordagens e sistemas. Aliado à isso, é perceptível uma lacuna existente na literatura sobre modelos de otimização que suportem as decisões especificamente sobre transporte entre plataformas *offshore* e terminais, uma vez que esta é uma das características peculiares da cadeia de suprimentos do petróleo no Brasil. Assim, neste trabalho é proposto um modelo de otimização que seja capaz de endereçar a complexidade e as particularidades do sistema logístico de escoamento de petróleo da Petrobras.

1.4 Metodologia de Pesquisa

Este projeto está estruturado dentro da temática e do contexto de Pesquisa Operacional (PO), com uso intensivo de técnicas de modelagem matemática e computacional. A seguir, são descritas a abordagem de pesquisa, seu esquema interpretativo e as técnicas que são empregadas.

² Esta profundidade pode alcançar mais de 7 mil metros. O termo “pré” é utilizado porque essas rochas foram sendo depositadas antes da camada de sal do fundo dos oceanos.

1.4.1 Abordagem de Pesquisa

Embora este estudo possa ser aplicado em outras malhas, o foco de estudo deste trabalho é a malha nacional de transporte marítimo entre plataformas e terminais portuários da Petrobras, sobre o qual se busca a elaboração de uma estrutura eficiente de roteirização e programação de navios. Desta forma, optou-se pela abordagem quantitativa, devido a sua natureza estrutural, bem como aos objetivos que ela busca atender. Segundo Martins (2010), esta abordagem de pesquisa se fundamenta nos elementos da estrutura do objeto de estudo e sua estrutura lógica baseia-se na dedução de hipóteses a partir da teoria, com a posterior operacionalização de tais hipóteses em observações e coletas de dados.

Posteriormente, processam-se os dados para sua respectiva análise e interpretação de resultados que, por meio da indução, podem influenciar a própria teoria inicialmente empregada para deduzir as hipóteses de pesquisa. Assim, de acordo com Chalmers (1995), a pesquisa quantitativa está fortemente baseada no paradigma do indutivismo combinado com o dedutivismo, que pode ser ilustrado esquematicamente pela figura 1.1.

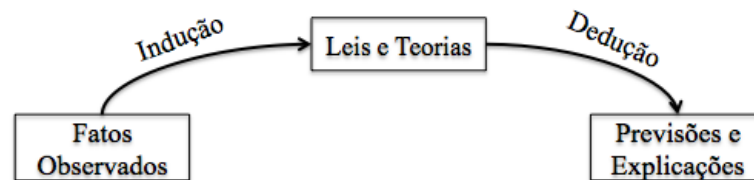


Figura 1.1 - Indutivismo e dedutivismo combinados.

Fonte: Adaptado de Chalmers, 1995:23.

A pesquisa em gestão de produção e operações baseada em modelos quantitativos pode ser classificada como uma abordagem de geração de conhecimento racional. Ela parte da premissa de que é possível construir modelos que expliquem pelo menos parte do comportamento de processos reais, ou que é possível capturar parte dos problemas de tomada de decisão encontrados em processos reais, o que é justamente o problema de pesquisa do trabalho proposto (MEREDITH et al., 1989; MORABITO; PUREZA, 2010; BERTRAND; FRANSOO, 2002, 2009).

1.4.2 Método de Pesquisa

O método de pesquisa selecionado para a condução deste trabalho consiste no processo de modelagem e abordagem da Pesquisa Operacional. O processo de modelagem se inicia com a formulação do problema por meio de variáveis de interesse e suas respectivas relações matemáticas. Em seguida, parte-se para a análise, ou dedução, etapa na qual são aplicadas técnicas matemáticas e tecnologia para resolver o modelo matemático e visualizar possíveis conclusões e decisões sugeridas. Posteriormente, vem a etapa de interpretação, que discute as conclusões e decisões com relação ao seu alinhamento com o problema real e a possibilidade de tomada de decisões em ambiente real. Por fim, procede-se a uma etapa de avaliação, ou julgamento, sobre as conclusões obtidas para medir a adequação ao escopo do trabalho. A figura 1.2 fornece uma visão consolidada deste processo geral de modelagem. (ARENALES et al., 2007; MORABITO; PUREZA, 2010).

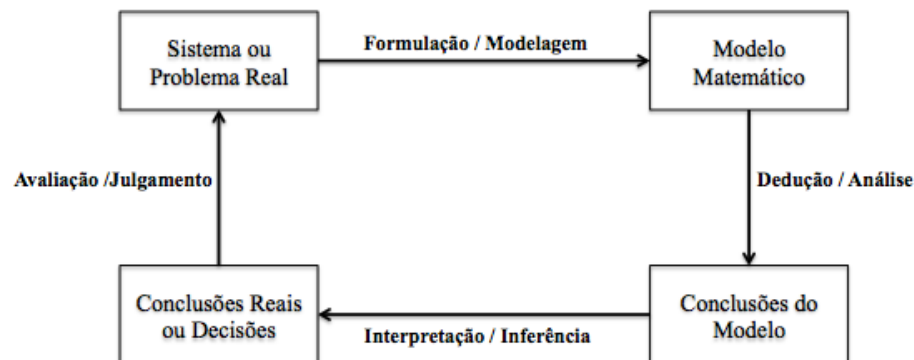


Figura 1.2 – Processo de modelagem em Pesquisa Operacional.

Fonte: Adaptado de Arenales et al., 2007:4.

De acordo com Morabito e Pureza (2010), o procedimento geral da Pesquisa Operacional envolve, basicamente, as seguintes fases:

1. *Definição do problema:* inicialmente são definidos o escopo do problema e as decisões e objetivos envolvidos, além do desenho do modelo conceitual descrito acima. Definem-se, também, as limitações impostas ao modelo e possíveis alternativas de decisão. Para este trabalho, a definição do problema ocorre em fina sintonia com as operações da companhia estudada, uma vez que são os operadores que tomam, atualmente, as decisões sobre a frota de navios. O principal objetivo é definir o problema sob a perspectiva dos

tomadores de decisão, valorizando os aspectos mais importantes e descartando aqueles que não apresentam grande impacto nas situações reais vividas pela empresa;

2. *Construção do modelo*: nesta fase um modelo matemático é desenvolvido e avaliado, a partir do modelo conceitual e baseado em outros modelos encontrados na literatura de Pesquisa Operacional. No caso específico desta pesquisa, ocorre a participação de analistas de Pesquisa Operacional da Petrobras, de forma a garantir que a construção do modelo seja amplamente compreendida por todas as partes envolvidas e as perspectivas técnicas da empresa sejam preservadas no desenho do modelo;

3. *Solução do modelo*: esta etapa é realizada utilizando-se *software* e *hardware* específicos, que são baseados em algoritmos definidos como uma sequência finita e não ambígua de instruções computáveis para solucionar um problema. Para este projeto, são utilizados os equipamentos do Laboratório do Grupo de Pesquisa Operacional do DEP-UFSCar. São desenvolvidos e aplicados métodos de solução exatos e heurísticos – os primeiros servem como base de comparação para o desempenho das heurísticas, pelo menos para problemas teste de tamanho reduzido, e a validação das premissas e regras de negócio envolvidas na modelagem do problema e a consequente captura de características intrínsecas, enquanto os segundos tem a finalidade de gerar soluções factíveis, com vistas a ter um bom desempenho computacional. Os métodos exatos utilizados são os disponíveis dentro do sistema de modelagem GAMS (*General Algebraic Modelling Language*), com a utilização dos *solvers* comerciais para resolver os modelos, especialmente CPLEX e GUROBI (GAMS, 2013; IBM, 2013a,b; GUROBI, 2013), baseados em métodos *branch-and-cut*.

4. *Validação do modelo*: nesta fase o modelo é verificado com relação à representação apropriada do problema, de forma a descrever adequadamente o comportamento do sistema real, diante de hipóteses previamente definidas. Em geral, busca-se a aderência do modelo às regras de negócio explicitadas pelo problema;

5. *Implementação da solução*: nesta última fase, dá-se uma grande ênfase à tradução dos resultados do modelo em conclusões ou decisões práticas, implementando a solução obtida e validada do modelo dentro do contexto real da organização. Destaca-se que o alcance do escopo deste projeto de mestrado se limita ao início desta fase, uma vez que o resultado final da dissertação será uma abordagem de otimização para ser integrada futuramente a um protótipo computacional. Portanto, a implementação em seu sentido mais amplo, que contempla sua possível implantação no ambiente real, treinamentos de funcionários e integração dos sistemas de TI da empresa, está fora do escopo deste trabalho.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices. O presente capítulo, denominado de *Introdução*, apresenta o problema de pesquisa, seus objetivos gerais e específicos, argumentos que justificam a importância da execução deste trabalho e a metodologia empregada.

A revisão bibliográfica pertinente é apresentada no capítulo 2, *Referencial teórico*, de tal forma a abordar os principais processos e aspectos da cadeia produtiva do petróleo, questões sobre transporte marítimo, passando para a exposição de modelos de roteirização e os principais métodos heurísticos existentes. Por fim, uma revisão bibliográfica é apresentada com enfoque direto em trabalhos que utilizam modelos de roteirização e programação de veículos aplicados ao transporte marítimo.

O capítulo 3, intitulado *Descrição do problema e modelagem matemática*, é iniciado com uma breve caracterização da empresa que compõe o estudo de caso deste trabalho, passando por uma descrição detalhada do sistema de escoamento de petróleo *offshore* e, por fim, apresentando a modelagem matemática do problema considerado.

O capítulo 4, denominado *Experimentos com modelo e resultados computacionais*, apresenta os resultados oriundos dos testes iniciais ilustrativos (*toy models*) com o modelo matemático e os principais experimentos realizados com dados reais fornecidos pela empresa.

O capítulo 5, denominado *Métodos Heurísticos de Solução*, apresenta as heurísticas *relax-and-fix* desenvolvida para o modelo proposto, bem como os resultados computacionais dos seus experimentos.

Por fim, o capítulo 6, denominado *Conclusões*, apresenta as principais considerações finais acerca do trabalho e aponta também perspectivas de pesquisa futura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cadeia produtiva do Petróleo

A cadeia produtiva engloba todas as etapas do processo produtivo do petróleo, que se inicia com a fase de prospecção até o refino e consequente distribuição dos produtos para o mercado consumidor. Esta seção apresenta uma caracterização geral do sistema produtivo, bem como uma visão concisa de suas principais etapas.

2.1.1 Características gerais

De acordo com as características encontradas em Petrobras (2014a,b) e ANP (2012 a,b), é possível posicionar o sistema produtivo do petróleo dentro da classificação multidimensional proposta por MacCarthy e Fernandes (2000). Neste modelo, os autores definem 12 variáveis (dimensões) do sistema produtivo, cujo principal item para classificá-los é o nível de repetitividade alcançado pela produção. Define-se um item repetitivo como aquele que consome ao menos 5% do tempo anual disponível da unidade produtiva, e um sistema repetitivo como aquele que apresenta acima 75% de itens repetitivos. O quadro 2.1 fornece uma visão consolidada das variáveis para uma empresa típica do setor petrolífero. Esta classificação é particularmente útil para fornecer uma visão sintética e resumida da operação petrolífera do ponto de vista do planejamento e controle da produção e logística, atividade a qual impacta diretamente nas decisões das refinarias e que, por sua vez, desdobram-se em decisões operacionais de roteirização e programação de navios que são tratadas neste trabalho.

Quadro 2.1 – Classificação de uma empresa típica do setor petrolífero segundo a metodologia de MacCarthy e Fernandes (2000).

Dimensão	Classificação	Justificativa
Tamanho da empresa	Grande	Todas as empresas do setor apresentam número de funcionários superior a 500
Tempo de resposta	DL (<i>distribution leadtime</i>)	O sistema opera com estoque nos pontos de distribuição dos produtos (postos e lojas especializadas)

Nível de repetitividade	Sistema Repetitivo (RP)	O <i>mix</i> de produção apresenta um elevado número de itens diferentes
Nível de automação	Rígido	A indústria de processo, tipicamente, apresenta uma forte dependência de automação
Estrutura do Produto	Produto <i>Single-Level</i>	A produção não requer montagem
Nível de customização	Padronizado	Os produtos são padronizados e não sofrem influência dos clientes finais na definição de especificações
Número de Produtos	Múltiplos produtos	São comercializados cerca de 10 itens
Tipos de Estoque	Estoque intermediário e final	Há estoque de produtos finais, estoque em trânsito (navios) e estoque em processo (refinarias)
Tipos de <i>layout</i>	Arranjo por produto (<i>product layout</i>)	Todas as etapas estão estruturadas em modelo “em fluxo”
Tipos de fluxo	<i>Flow-shop</i>	O fluxo é unidirecional e está sujeito a múltiplos estágios na produção da refinaria
Tipos de Montagem	Não requer	Não requer montagem
Tipos de Organização do Trabalho	Variável	Depende da política interna da organização em questão.

2.1.2 Prospecção

Segundo a Petrobras (2014c), o ponto de partida na busca do Petróleo é a exploração ou prospecção, que realiza os estudos preliminares para a localização de uma jazida. A moderna exploração do Petróleo utiliza um grande conjunto de métodos de investigação na procura das áreas onde essas condições básicas possam existir. A geologia de superfície analisa as características das rochas na superfície e pode ajudar a prever seu comportamento a grandes profundidades. Os métodos geofísicos, por sua vez, tentam, através de sofisticados instrumentos, fazer uma análise detalhada do subsolo, que traz valiosos dados e permite selecionar uma área que reúna condições favoráveis à existência de um campo petrolífero.

Ainda segundo a empresa, dentro do campo da geologia do petróleo também são examinadas as rochas superficiais e o terreno com a ajuda adicional de imagens de satélite. No entanto, é usada também uma variedade de outros métodos para encontrar petróleo. Podem ser utilizados, por exemplo, sensíveis medidores de gravidade para avaliar pequenas

alterações no campo gravitacional da Terra que possam indicar o petróleo fluindo, assim como magnetômetros de alta sensibilidade para medir minúsculas mudanças no campo magnético terrestre causadas pelo fluxo do petróleo. Entretanto, o método mais comum é a sismologia, criando ondas de choque que passam através das camadas ocultas de rochas, interpretando as ondas que são refletidas de volta para a superfície.

2.1.3 Perfuração

A perfuração é a segunda fase na busca do Petróleo. Ela ocorre em locais previamente determinados pelas pesquisas Geológicas e Geofísicas e, para isso, realiza-se a perfuração de um poço, denominado “poço pioneiro”, mediante o uso de uma sonda. Esse trabalho é feito através de uma Torre que sustenta a coluna de perfuração, formada por vários tubos. Na ponta do primeiro tubo encontra-se uma broca, que tritura a rocha e abre o caminho das camadas subterrâneas. Uma vez comprovada a existência de petróleo, outros poços são abertos para se avaliar a extensão da jazida e determinar se é comercialmente viável extrair o petróleo descoberto naquela região. Em caso positivo, o número de poços perfurados forma um Campo de Petróleo (UNICAMP, 2012).

2.1.4 Transporte

A fase de transporte consiste em tornar o petróleo explorado nas plataformas disponível nas refinarias. O modal com menor participação no transporte de petróleo e derivados no Brasil é o rodoviário, seguido pelos modais ferroviário, dutoviário e aquaviário, sendo este último o de maior participação em vista da grande produção de petróleo no país estar concentrada na exploração *offshore*. Como exemplo da grande importância do modal aquaviário no transporte de hidrocarbonetos no Brasil, pode-se citar a Bacia de Campos que é responsável por cerca 82,5% da produção nacional de petróleo e tem 80% de sua produção total escoada por navios e o restante (20%) via dutos (PETROBRAS, 2014a,c; DAVOGLIO et al., 2011; SHREVE, BRINK, 1980).

2.1.5 Produção

Como a porção mais significativa da produção brasileira é operada no modelo *offshore*, a etapa de produção propriamente dita se dá por meio das plataformas petrolíferas,

que são grandes estruturas usadas na produção em alto mar para abrigar trabalhadores e as máquinas necessárias para a perfuração de poços no leito do oceano visando à extração de petróleo. Dependendo das circunstâncias, a plataforma pode ser fixada ao oceano, consistir de uma ilha artificial ou pode, ainda, flutuar. As plataformas são classificadas de acordo com a finalidade que se destinam e a profundidade da lâmina d'água em que irão atuar. O petróleo comumente surge associado a gás natural e água ao decorrer de seu processo produtivo. O gás natural, após o tratamento, pode ter diferentes fins, podendo ser utilizado para a geração de energia em termoeletricas ou ser comercializado como matéria-prima para outras indústrias e geração de energia. A água, por sua vez, deve receber um tratamento para retirar parte do óleo presente e, assim, poder ser descartada em um corpo d'água. Dessa forma, durante a etapa de produção existe uma fase de pré-tratamento, cujo objetivo é separar gás e remover água e impurezas para que o óleo seja suficientemente estável e adequado para as etapas de refino (ANP, 2012b; UNICAMP, 2012).

Posteriormente, o petróleo passa pela etapa de refino, que pode ser definida como a ação de separar as frações de petróleo bruto desejadas, processá-las e transformá-las em produtos de grande utilidade, os chamados derivados de petróleo. Uma refinaria de petróleo, ao ser planejada e construída, pode destinar-se a dois objetivos básicos: a produção de combustíveis e matérias-primas petroquímicas, e a produção de lubrificantes e parafinas. De acordo com a ANP (2012a), todas as refinarias brasileiras encontram-se no grupo que objetiva produzir combustíveis e matérias-primas petroquímicas.

A figura 2.1 mostra uma visão geral dos processos de conversão e separação que ocorrem dentro das refinarias.

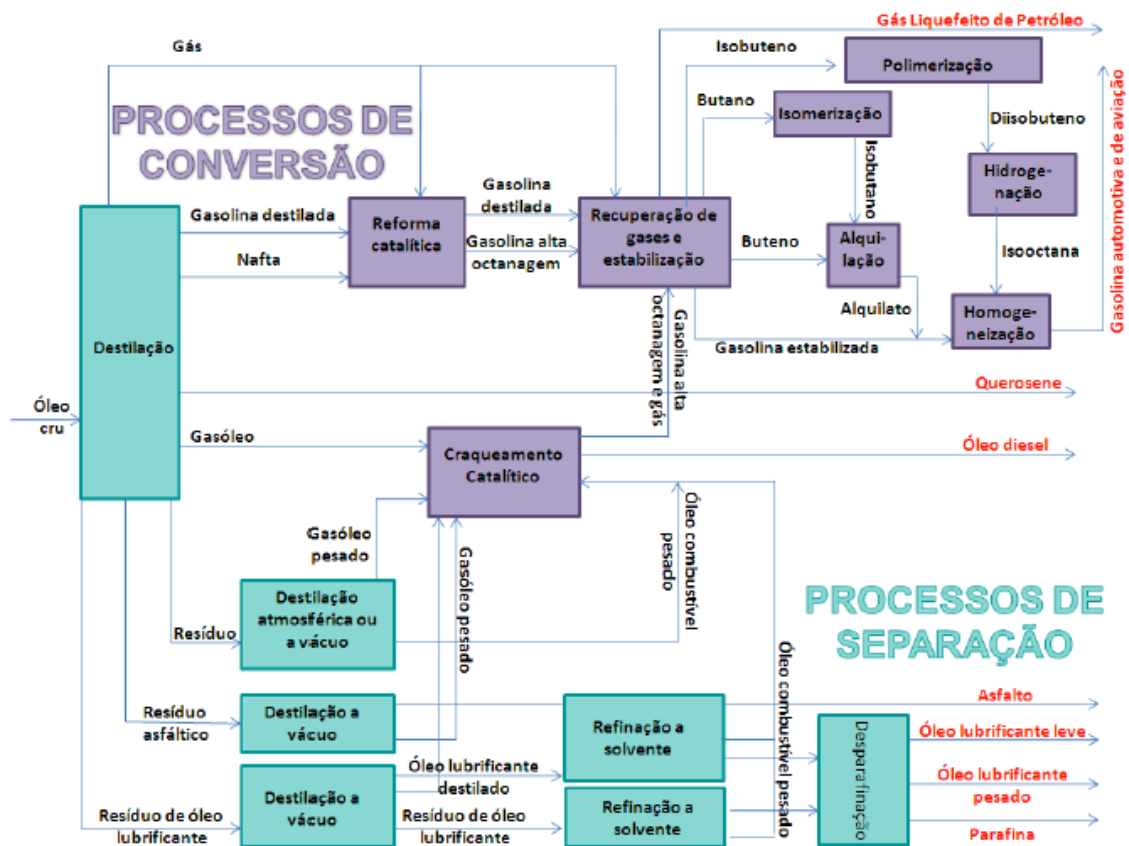


Figura 2.1 – Etapas produtivas do processo de refino de petróleo.
Fonte: Adaptado de Davoglio et al. (2011) e Shreve e Brink (1980).

Os itens destacados em vermelho constituem os produtos finais da refinaria que estão prontos para serem distribuídos e comercializados. Uma vez que o escopo deste trabalho limita-se a uma visão concisa do processo produtivo, as etapas em destaque na figura 2.1 não são aqui detalhadas.

2.2 Transporte Marítimo

O transporte marítimo é o maior conduto do comércio internacional e sua capacidade de transporte de carga aumentou cerca de 25% desde 1980, demonstrando que a economia global tem apresentado cada vez mais dependência desta modalidade de transporte. Um navio envolve um grande investimento de capital e o custo operacional diário pode atingir dezenas de milhares de dólares para os navios de maior porte. Dessa forma, o planejamento adequado de frotas e de suas operações tem o potencial de melhorar o seu desempenho econômico e reduzir os custos de transporte. Isso é muitas vezes um desafio fundamental

enfrentado pelos agentes da indústria no sentido de manter a competitividade de suas operações (CHRISTIANSEN; FAGERHOLT; RONEN, 2004).

Christiansen et al. (2007) afirma que os problemas de planejamento da frota de navios são diferentes daqueles de outros modais de transporte, porque os navios operam em condições diferentes e apresentam uma série de particularidades. As principais características que impactam diretamente o tratamento dos problemas de planejamento de transporte marítimo são os altos graus de incerteza aos quais as decisões estão submetidas e as estreitas janelas de tempo que são impostas aos navios para carregar e descarregar suas mercadorias em portos ou terminais.

Existem três modos básicos de operação de navios: *liner*, *tramp* e industrial. *Liners* operam de acordo com um itinerário e horário determinados, similares a uma linha regular de ônibus, e a demanda por seus serviços depende de suas programações; neste modelo os operadores marítimos geralmente controlam os navios de carga. No modo *tramp*, também conhecido como VCP (*Voyage Charter Party*), os navios seguem os pontos em que as cargas estão disponíveis, de forma semelhante a um táxi, e muitas vezes se engajam em contratos de afretamento, que consiste em transportar quantidades especificadas de carga entre os portos especificados dentro de um prazo determinado e dentro do acordo de pagamento por tonelada. Tanto no modo *liner* quanto no *tramp*, os operadores buscam maximizar seus lucros por unidade de tempo. Por fim, os operadores industriais geralmente possuem as cargas embarcadas e controlam diretamente as embarcações utilizadas para enviá-las e, neste modo, os navios podem ser de frota própria ou terceirizada, e o objetivo é minimizar o custo de transportar as cargas. Quando a frota é terceirizada, o contrato é do tipo TCP (*Time Charter Party*) (RONEN, 1993). Dentro do contexto deste trabalho, o objeto de estudo pode ser enquadrado no modo industrial.

O transporte marítimo de petróleo cru, especificamente, começou no final do século XIX. Desde então, o volume de petróleo transportado por vias marítimas tem aumentado constantemente, sendo as duas únicas exceções significativas as crises do petróleo de 1973 e 1979, que provocaram uma considerável diminuição no consumo e produção de petróleo. Os petroleiros transportam atualmente mais de 1,86 bilhões de toneladas de petróleo cru por ano através dos mares (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2006).

A força motriz primordial para o transporte de petróleo cru são os requisitos das refinarias, que o utilizam para derivar uma série de produtos petrolíferos. As definições e decisões sobre o tipo e quantidade de um determinado produto derivado de petróleo

dependem da capacidade das refinarias e dos tipos de petróleo cru disponíveis. As operações de refino normalmente requerem vários tipos de petróleo bruto diferentes para produzir sua linha de produtos desejada com vistas a atender as demandas posicionadas. A demanda do mercado dinâmico global de petróleo bruto e produtos refinados exige operações de refino versáteis. Se os requisitos de refinaria ou as opções de fornecimento se alterarem, o transporte tem de ser adaptado (HENNIG et al, 2011).

2.3 Modelos de Roteirização

Segundo Ronen (1993), no contexto marítimo, a roteirização pode ser definida como a designação da sequência de pontos a serem visitados por um navio, enquanto que o *scheduling* (ou programação) determina e distribui recursos ao longo do tempo. Há ainda, segundo o autor, um terceiro conceito que causa confusão com *scheduling*, que é o chamado *deployment*, cuja principal característica é a designação de embarcações da frota para rotas comerciais ou outras tarefas específicas. É importante destacar, portanto, que *scheduling* trata de alocação de recursos em um instante de tempo, enquanto que o *deployment* refere-se às decisões de alocação de recursos.

Pesquisas anteriores sobre roteirização e *scheduling* trataram diversos aspectos do problema real, baseados em estudos de caso dentro de importantes companhias produtoras. Características que tem sido exploradas incluem frotas heterogêneas de petroleiros, múltiplos produtos, restrições que limitam o acesso aos portos, restrições físicas e janelas de tempo. Tipicamente, uma carga é definida como uma quantidade determinada a ser transportada entre um ponto de carregamento e um porto de descarregamento por um único navio em uma viagem única. Pouca atenção tem sido dada aos casos em que o transporte de cargas individuais pode ser compartilhado entre os navios. Tal problema é normalmente referido na literatura como um problema de separação ou *split*. (SHERALI, AL-YAKOOB, HASSAN, 1999; HENNIG et al. 2011; CHRISTIANSEN et al., 2004).

Vatn (2007), Christiansen et al. (2004) e Hennig et al. (2011) afirmam que os problemas logísticos no contexto marítimo são totalmente baseados em formulações clássicas de roteirização e *scheduling*, tipicamente aplicados aos modais terrestres. Dessa forma, esses trabalhos encontrados na literatura são construídos a partir de problemas já bem conhecidos na Pesquisa Operacional. Lenstra e Rinnooy Kan (1981) realizaram um estudo que sintetiza a

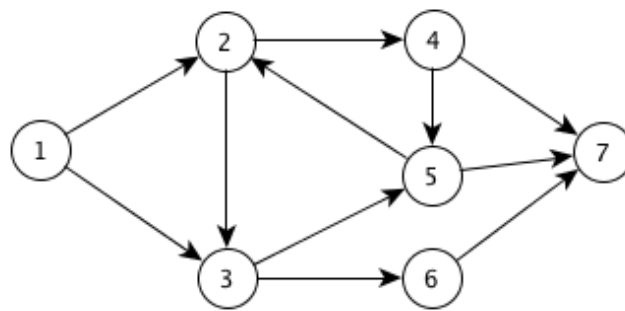
análise da complexidade computacional de problemas de roteirização de veículos, após o qual concluíram que praticamente todos estes problemas são do tipo NP-difícil.

Neste tópico, os problemas são brevemente descritos em uma ordem crescente de generalização e complexidade de abordagem, começando com o modelo conhecido como Problema do Caixeiro-Viajante ou TSP (*Traveling Salesman Problem*), passando para o Problema de Roteirização de Veículos ou VRP (*Vehicle Routing Problem*) e o Problema de Coleta e Entrega ou PDP (*Pick-up and Delivery Problem*). Para estes problemas, existe também a abordagem adicional contemplando janelas de tempo para as visitas em cada nó, conhecido como Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo ou VRPTW (*Pick-up and Delivery with Time Windows*) e Problema de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo ou PDPTW (*Pick-up and Delivery Problem with Time Windows*), respectivamente. É necessário destacar que a dimensão de programação destes problemas advém justamente da consideração de janelas de tempo, o que exige a alocação de tempos para as visitas a cada um dos nós do sistema (DESROISIERS et al., 1995). Por fim, um modelo derivado também do PDP considerando separação (*split*) de cargas, denominado Problema de Coleta e Entrega com Cargas Fracionadas ou PDPSL (*Pick-up and Delivery Problem with Split Loads*), é também brevemente apresentado. Para todos os problemas apresentados neste capítulo, optou-se por preservar a notação matemática original empregada pelos autores. No entanto, para os próximos capítulos, por conveniência, será adotada uma notação própria para representar o problema.

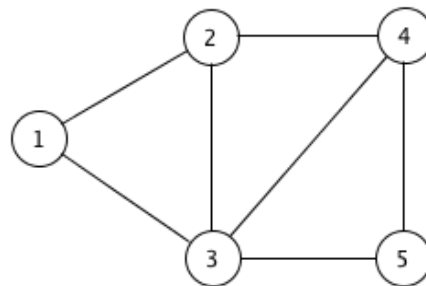
2.3.1 Conceitos e definições básicas em grafos

A apresentação de todos os conceitos e definições deste item 3.3.1 foram inspirados no trabalho de Ahuja, Magnanti e Orlin (1993), que define um conjunto teórico muito bem estruturado para otimização em grafos, que é uma das representações utilizadas para modelar problemas em logística, especialmente no que se refere à roteirização e programação de veículos.

Segundo a definição, um grafo $G = (N, A)$ consiste em um conjunto N de nós e um conjunto A de arcos. Um grafo pode ser *direcionado* ou *não direcionado* – o primeiro ocorre quando o conjunto A de arcos é formado por pares ordenados de diferentes nós, já o segundo é definido quando os pares de nós não são ordenados. A figura 2.2 apresenta exemplos de grafos direcionados e não direcionados.



(a)



(b)

Figura 2.2 – (a) Exemplo de grafo direcionado. (b) Exemplo de grafo não direcionado.

O *grau* de um determinado nó de um grafo é dado pela soma do número de arcos que saem e entram neste nó. Por exemplo, na figura 2.2(a), o nó 3 apresenta grau 4, pois há 2 arcos que saem e 2 arcos que chegam nele.

Um grafo $G' = (N', A')$ é um *subgrafo* de $G = (N, A)$ se $N' \subseteq N$ e $A' \subseteq A$.

Um *passeio* em um grafo direcionado é definido como uma sequência de nós e arcos $i_1 - a_1 - i_2 - a_2 - \dots - i_{r-1} - a_{r-1} - i_r$ que satisfaz a propriedade de que para todo $1 \leq k \leq r-1$ ou $a_k = (i_k, i_{k+1}) \in A$ ou $a_k = (i_{k+1}, i_k) \in A$. Uma definição alternativa de passeio pode ser dada como uma sequência de nós em que cada dois nós consecutivos são ligados por um arco. A figura 2.3 apresenta dois exemplos de passeio.

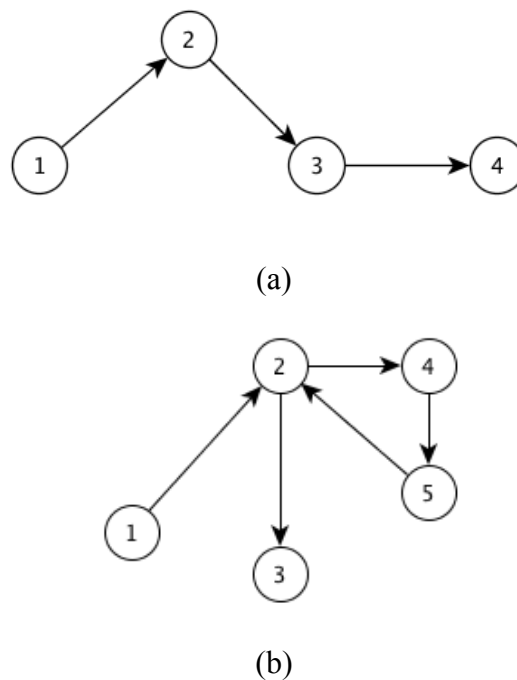


Figura 2.3 – Exemplos de passeios em grafos.

Um *caminho*, por sua vez, é definido como um passeio sem qualquer repetição de nós. A figura 2.3(a) é um exemplo de caminho, enquanto que a figura 2.3(b) não representa um caminho por repetir o nó 2. O caminho pode ser direcionado ou não direcionado, de acordo com as definições já expostas.

Um *ciclo* (ou *circuito*) é um caminho $i_1 - i_2 - \dots - i_r$ somado ao arco (i_r, i_1) ou (i_1, i_r) . Em outras palavras, um circuito pode ser entendido como um caminho que inicia e termina no mesmo nó. O circuito, assim como o caminho, pode ser direcionado ou não direcionado. Tanto um caminho quanto um circuito podem, ainda, ser classificados como *Hamiltoniano*, no qual o caminho (ou circuito) tem todos os seus nós do grafo percorridos exatamente uma vez.

Outro conceito importante em Teoria de Grafos é a *conectividade* de um grafo, que pode ser definida da seguinte forma: dois nós i e j são *conectados* se existe ao menos um caminho que sai do nó i e chega no nó j . Assim, um grafo é *conectado* quando cada um dos seus pares de nós é conectado. Caso contrário, o grafo é referido como *desconectado*. Além disso, um grafo é dito *fortemente conectado* quando ele apresenta ao menos um caminho direcionado de qualquer nó para qualquer outro nó do grafo.

Com isso, é possível introduzir os principais problemas que são tratados na literatura de roteirização e programação de veículos.

2.3.2 Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesman Problem*)

Um caixeiro-viajante é, geralmente, um vendedor que está interessado em visitar um conjunto de cidades exatamente uma vez, começando e terminando em sua cidade de origem. Essa situação alegórica é o pano de fundo para descrever o conhecido *Traveling Salesmen Problem* ou TSP, que é utilizado como estruturação de vários subproblemas em aplicações de Logística. Este problema já apresentava uma combinação de métodos de solução orientados à problemas práticos desde 1954 (DANTZIG, FULKERSON, JOHNSON, 1954; JÜRGEN, REINELT, RINALDI, 1995).

Basicamente, dado um grafo $G = (V, A)$, o TSP tem como objetivo construir um circuito fechado que percorra cada um dos nós, uma e somente uma vez, retornando ao nó inicial quando finalizado. Ao mesmo tempo, busca-se minimizar a distância percorrida ou o custo incorrido. Os nós, neste caso, representariam os clientes a serem visitados – daí surge o nome pelo qual o problema é referido. Um exemplo do TSP pode ser visualizado na figura 2.4. Este problema pode ser estendido para o caso de múltiplos caixeiros-viajantes e, neste caso, cada cliente (nó) ainda deve ser visitado uma única vez e todos os caixeiros-viajantes devem começar e terminar seus circuitos no mesmo nó. A questão principal reside em determinar como cada um dos caixeiros-viajantes dividirá os clientes entre si, fazendo com que o custo total do sistema seja mínimo (JÜRGEN, REINELT, RINALDI, 1995; VATN, 2007).

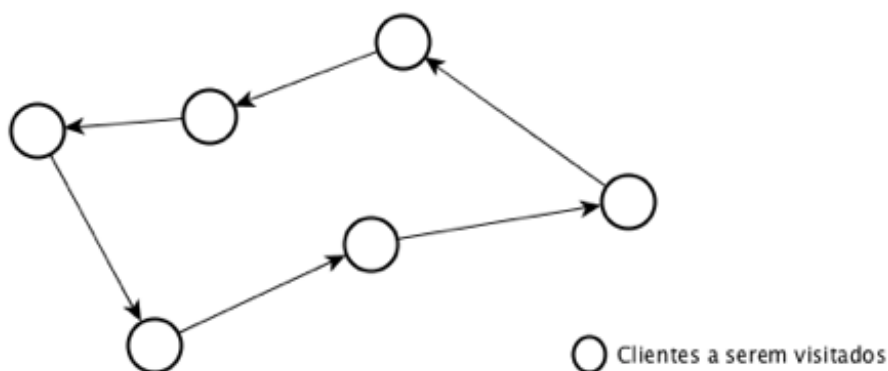


Figura 2.4 – Exemplo esquemático de um TSP

2.3.3 Problema de Roteirização de Veículos (*Vehicle Routing Problem*)

O Problema de Roteirização de Veículos (*Vehicle Routing Problem* - VRP) foi introduzido por Dantzig e Ramser (1959), que aplicam os conceitos de VRP para uma frota de caminhões que entregam gasolina de terminais de carga para um grande número de postos de combustível. O primeiro trabalho a empregar o termo “*vehicle routing*” em seu título foi o de Golden, Magnanti e Nguyen (1972). De acordo com Laporte (2009), o VRP é uma generalização do TSP, porém muito mais difícil de ser resolvido na prática. Enquanto atualmente existem algoritmos exatos que resolvem TSP contendo dezenas ou centenas de nós, isto não ocorre para VRP, problema para o qual os melhores algoritmos exatos resolvem instâncias envolvendo aproximadamente 100 nós (FUKASAWA et al., 2006; BALDACCI, CHRISTOFIDES, MINGOZZI, 2008).

Eksioglu, Vural e Reisman (2009) apresentam uma revisão sistemática de literatura de VRP que dá origem a um *survey* com proposta de estrutura taxonômica do problema. A principal motivação dos autores é o crescente interesse comercial por VRP e o comportamento crescente do número de publicações acadêmicas sobre o tema ao longo dos últimos anos. Importantes trabalhos de revisão de literatura e propostas de classificações para o VRP podem ser vistos em Bodin et al. (1983), Christofides (1985), Laporte e Nobert (1987), Desrochers, Lenstra e Savelsbergh (1990), Toth e Vigo (2002), Golden, Raghavan e Wasil (2008) e Laporte (2009).

O VRP clássico pode ser descrito como o problema de designar as rotas de menor custo a partir de um centro (depósito) para um conjunto geograficamente disperso de pontos ou nós, que podem representar cidades, lojas, clientes ou armazéns. Essas rotas devem ser projetadas de tal forma que cada nó seja visitado somente uma vez por um veículo, começando e terminando no depósito central. A capacidade de cada veículo que realiza o transporte é levada em consideração nesses modelos, de tal forma que a soma das demandas ao longo da rota não pode excedê-la (LAPORTE, 1992). A figura 2.5 representa um exemplo esquemático de VRP.

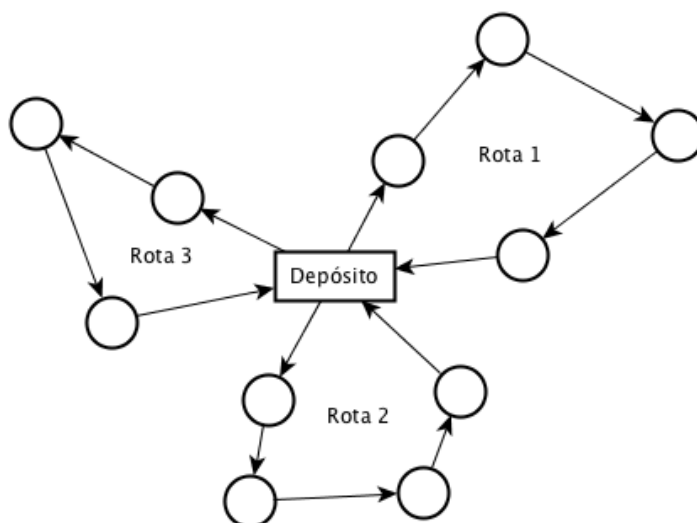


Figura 2.5 – Exemplo esquemático de um VRP.

Para melhor ilustrar este problema conceitualmente, define-se um grafo $G = (V, A)$, onde $V = \{1, \dots, n\}$ é um conjunto de cidades com um depósito localizado no nó 1 e A um conjunto de arcos. Para cada arco (i, j) $i \neq j$, associa-se uma matriz de distância não-negativa $C = (c_{ij})$ que pode, na prática, representar o custo ou tempo de viagem de i para j . Quando C é simétrico, ou seja, $c_{ij} = c_{ji}$, é conveniente substituir A por um conjunto E de arcos não direcionados e o problema torna-se conhecido como VRP simétrico. Por sua vez, quando $c_{ij} \neq c_{ji}$, o problema é conhecido como VRP assimétrico. Em muitos casos práticos, a matriz de custos satisfaz a chamada desigualdade triangular, tal que $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij} \quad \forall i, j, k \in V$. Considere também que existam m veículos disponíveis que estão baseados no depósito inicial, no qual $m_L \leq m \leq m_U$. Quando $m_L = m_U$, diz-se que m é um valor fixado, por outro lado, quando $m_L = 1$ e $m_U = n - 1$, diz-se que m é livre e é necessário associar, neste caso, um custo fixo f para o uso de cada veículo (LAPORTE, 1992; LAPORTE, 2009; EKSIÖGLU, VURAL, REISMAN, 2009; TOTH, VIGO, 1998). Assim, a descrição do VRP pode ser dada, matematicamente, como o problema de achar uma coleção de no máximo m circuitos, cada um correspondendo a uma rota, com custo mínimo, definida como a soma de todos os custos dos arcos do circuito, tal que:

- i. cada circuito visita o nó 1, que caracteriza o depósito ou, alternativamente, cada rota se inicia e se encerra no depósito;
- ii. cada nó $j \in V \setminus \{1\}$ é visitado exatamente uma vez no circuito;

- iii. a soma das demandas dos nós visitados pelo circuito não excede a capacidade C do veículo – nesse caso o problema é comumente referido como CVRP (*capacity-constrained vehicle routing problem*).

De acordo com Laporte (1992) e Cordeau et al. (2002), há condições adicionais que são geralmente consideradas em abordagens baseadas em VRP, tais como:

- i. o número de nós em qualquer rota é limitado superiormente por um valor q ;
- ii. qualquer rota pode ser restrita com relação a sua duração no tempo, não excedendo, portanto, um valor L prescrito. Geralmente, este valor é composto dos tempos de viagens c_{ij} e dos tempos de parada δ_i em cada um dos nós i e j . Estes problemas são referidos como DVRP (*distance-constrained* ou *time-constrained vehicle routing problem*);
- iii. em muitas aplicações práticas, cada um dos nós precisa ser visitado dentro de uma janela de tempo geralmente dada por um intervalo do tipo $[a_i, b_i]$;
- iv. alguns nós podem guardar relações de precedência entre si, de tal forma que um determinado nó i deve ser visitado antes do nó j , por exemplo.

Para definir o VRP matematicamente, é apresentada a formulação matemática geral em Desroisiers et al. (1995) para o VRPTW, que é uma generalização do VRP com a restrição adicional das janelas de tempo. Assim, este problema consiste basicamente em projetar roteiros de custo mínimo, iniciados e encerrados em um depósito central, para uma frota de veículos que serve um conjunto de clientes com demandas conhecidas. Cada um dos clientes deve ser visitado uma única vez, de tal forma que a capacidade do veículo não seja excedida. O serviço em um nó cliente deve iniciar-se dentro da janela de tempo definida entre o tempo mais cedo e o tempo mais tarde em que o cliente permite que o início do serviço aconteça.

De uma forma geral, as janelas de tempo podem ser rígidas (*hard time windows*) ou flexíveis (*soft time windows*). Para o primeiro caso, se o veículo chega muito cedo, permite-se esperar até o cliente estar pronto para iniciar o serviço, porém não é permitido que o veículo chegue após o fim da janela de tempo. Para o caso flexível, uma violação (atraso) da janela de tempo pode ocorrer sob a condição de aplicação de uma penalidade definida, como por exemplo custo. Duas heurísticas específicas para o VRPTW, baseadas em relaxação lagrangeana, são apresentadas, por exemplo, em Cunha e Gualda (2002) e em Pureza, Morabito e Reimann (2012), no qual apresentam-se abordagens baseadas em modelagem matemática e heurísticas para o problema VRPTW com múltiplos

entregadores. Muitas outras abordagens podem ser encontradas na literatura, como as citadas em Cordeau et al. (2002), Laporte (2009) e Laporte(1992).

Esta mesma formulação genérica para o modelo VRPTW em Desroisiers et al.(1995), também aparece em outros estudos, como em Cordeau et al. (2007a) e Laporte (2009). Seja $N = \{1, \dots, n\}$ o conjunto de clientes a serem visitados e K , indexado por k , o conjunto de veículos disponíveis para as visitas. Considere o grafo $G^k = (V^k, A^k)$, para todo $k \in K$, onde V^k é definido como $N \cup \{o(k), d(k)\}$, onde $o(k)$ e $d(k)$ representam o depósito de origem e o depósito de destino do veículo k , $k \in K$, respectivamente. O conjunto A^k contém todos os arcos factíveis da rede, sendo um subconjunto de $V^k \times V^k$.

Em uma versão do modelo que contemple somente coletas (*pick-up*) para cada cliente $i \in N$, existe uma demanda p_i a ser coletada com início dentro de uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ de serviço. Para isso, define-se um parâmetro de carga (*load*) $l_i = p_i$, $i \in N$. Para cada veículo $k \in K$, assume-se um valor de carga inicial $l_{o(k)}$. Note que para construir uma versão de entregas do modelo (*deliveries*), basta fazer $l_i = d_i$, onde d_i representa a demanda requerida pelo cliente i . Para cada arco $(i, j) \in A^k, k \in K$, há um custo associado c_{ijk} e um tempo de deslocamento definido por t_{ijk} . Nesta representação do modelo, assume-se que o tempo de serviço no nó i está incluso neste tempo de deslocamento. Todos os clientes devem ser designados a um máximo de v veículos, com $v \leq |K|$, de tal forma que a capacidade Q_k de cada veículo utilizado não seja excedida. É importante notar que um determinado arco $(i, j) \in A^k, k \in K$ pode ser eliminado por restrições temporais do tipo $a_i + t_{ijk} > b_j$, ou restrições de capacidade do tipo $l_i + l_j > Q_k$ (DESROISIERS et al, 1995).

Nesta representação, as variáveis de decisão são: variáveis binárias de fluxo $x_{ijk}, (i, j) \in A^k, k \in K$ que são iguais a 1 se o arco (i, j) é utilizado pelo veículo k , e 0 caso contrário; variáveis de tempo $T_{ik}, i \in V^k, k \in K$ que especificam o início do serviço no nó i ; e, por fim, variáveis de carga $L_{ik}, i \in V^k, k \in K$, que especificam a quantidade de carga do veículo k logo após o serviço no nó i .

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} c_{ijk} x_{ijk} \quad (2.1)$$

s.a.

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{o(k)jk} \leq \nu \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k)jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{ijk} - \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in V^k \setminus \{o(k), d(k)\} \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{id(k)jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.6)$$

$$x_{ijk} (T_{ik} + t_{ijk} - T_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k \quad (2.7)$$

$$a_i \leq T_{ik} \leq b_i \quad \forall k \in K, \forall i \in V^k \quad (2.8)$$

$$x_{ijk} (L_{ik} + l_j - L_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k \quad (2.9)$$

$$l_i \leq L_{ik} \leq Q_k \quad \forall k \in K, \forall i \in N \cup \{d(k)\} \quad (2.10)$$

$$L_{o(k)k} = l_{o(k)} \quad \forall k \in K \quad (2.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A^k \quad (2.12)$$

A função objetivo, dada por (2.1), representa o custo total incorrido pelo sistema. As restrições (2.2) impõem que cada cliente deva ser designado a exatamente uma rota. As restrições (2.3) garantem que o número de veículos utilizados esteja dentro do limite máximo de ν veículos. É possível associar um custo fixo para a designação de um veículo, principalmente em casos em que se deseja minimizar o número de veículos utilizados para atender todas as rotas. As restrições (2.4)-(2.6) descrevem o fluxo na rede o qual um veículo k irá utilizar, enquanto as restrições (2.7) e (2.8) garantem a factibilidade da programação, respeitando as janelas de tempo impostas. Por sua vez, as restrições (2.9)-(2.11) referem-se ao

balanço de massa e factibilidade das cargas, respeitando as capacidades dos veículos. Por fim, as restrições (2.12) garantem o domínio correto das variáveis do modelo.

O modelo (2.1)-(2.12) não é linear, pois as restrições (2.7) e (2.9) apresentam multiplicação direta de duas variáveis de decisão do problema. Dessa forma, uma maneira de representar o modelo acima como um problema de programação inteira mista é linearizar as restrições indicadas da seguinte forma:

$$T_{ik} + t_{ijk} - T_{jk} \leq (1 - x_{ijk})M_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A^k \quad (2.13)$$

$$L_{ik} + l_j - L_{jk} \leq (1 - x_{ijk})Q_k \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A^k \quad (2.14)$$

Ambas as linearizações apresentadas lançam mão de um método chamado *big-M* ou *M-grande*, que consiste em definir um valor constante arbitrariamente grande de tal forma que desative a restrição, tornando-a redundante, nos casos em que x_{ijk} não estão definidos. No caso da restrição (2.14), o valor que desempenha esse papel é justamente a capacidade Q_k do veículo.

2.3.4 Problema de Coleta e Entrega (*Pick-up and Delivery Problem*)

Segundo Dumas, Desrosiers e Soumis (1991), o Problema de Coleta e Entrega (*Pickup and Delivery Problem* - PDP) é uma variação do VRP e pode ser definido como um problema de planejamento no qual uma frota de veículos deve servir um conjunto de pedidos de transporte a uma dada capacidade com localidades de início e fim determinados. Cada pedido especifica o tamanho da carga a ser transportada, a localização onde ela deve ser coletada (*pickup*) e posteriormente entregue (*delivery*). Cada carga deve ser transportada por um único veículo desde sua origem até seu destino. O objetivo é minimizar o custo total de transporte, com as restrições de que cada coleta deva ser realizada antes de sua respectiva entrega. Uma importante revisão bibliográfica e proposta esquemática de classificação para problemas PDP do tipo estático é apresentada por Berbeglia et al. (2007). A figura 2.6 fornece uma visão esquemática do PDP (NOWAK et al., 2009; DESROISIERS et al., 1995).

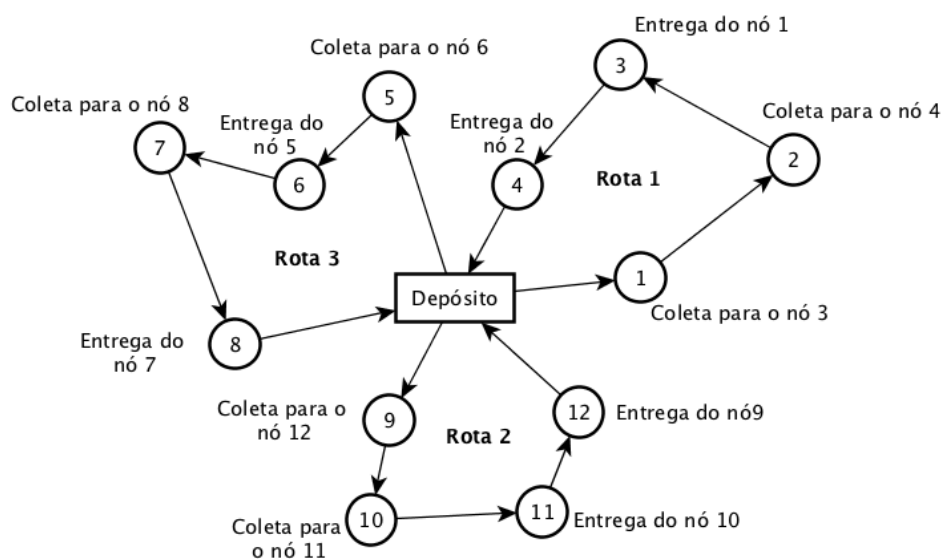


Figura 2.6 – Exemplo esquemático de PDP.

Cordeau et al. (2007b) definem esta classe de problemas como “transporte sob demanda” e afirmam que a literatura de Pesquisa Operacional apresenta muitos estudos para os casos dinâmicos e estáticos e que, além disso, a maioria das variações do modelo são, no fundo, generalizações de PDP. Os autores afirmam, ainda, que uma das características mais marcantes dessa classe de problema é a alta importância do aspecto temporal das entregas e coletas, geralmente transformadas em janelas de tempo.

Assim, uma primeira variação deste modelo, denominado Problema de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo (*Pick-up and Delivery Problem with Time Windows - PDPTW*), consiste em um caso geral do PDP com restrições adicionais de tempo para as coletas e entregas. Para cada ponto de coleta e entrega, designa-se uma janela de tempo pré-determinada para o veículo realizá-la, sendo penalizado caso não a cumpra. Em geral, os tempos de serviço também estão inclusos nas janelas de tempo, indicando o tempo total que a tarefa de coleta e entrega irá tomar daquele veículo. É importante destacar, ainda, que é permitido que o veículo chegue a uma determinada localidade antes da janela de tempo se iniciar, porém ele deverá aguardar que ela se inicie para empenhar a operação de carga ou descarga (CORDEAU et al., 2007b).

Uma segunda variação do PDP, conhecida como *Pick-up and Delivery Problems with Split Loads (PDPSL)*, considera a separação (*split*) das necessidades de carregamento. Neste modelo, as cargas pré-definidas, que possuem origem e destino específicos, podem ser separadas entre diferentes veículos, tanto na operação de coleta quanto

na de entrega. Estudos empíricos comprovam que existem benefícios impactantes em adotar essa prática, porém a magnitude deles está totalmente relacionada à estrutura do problema e à forma com que o modelo é construído para endereçar as decisões de separação de cargas (BELFIORE, YOSHIZAKI, 2009; NOWAK et al., 2008; NOWAK et al., 2009; DROR, LAPORTE, TRUDEAU, 1994).

A família de problemas do tipo PDP pode ainda ser classificada de acordo com três tipos principais, no que se refere aos produtos que são transportados. O primeiro deles é o PDP *single-commodity* (ou produto único), no qual apenas um tipo de produto é coletado ou entregue em cada nó da rede. Um exemplo prático é o transporte de dinheiro entre diferentes agências bancárias. A segunda classe é o PDP *two-commodity* (ou dois produtos), no qual dois produtos são considerados para coleta ou entrega em cada um dos nós. Um exemplo prático deste tipo de problema é o transporte de bebidas, no qual se pode entregar garrafas cheias de uma determinada bebida e recolher as vazias, o que caracteriza dois produtos. Por fim, a última classe é o PDP *n-commodity*, no qual cada produto está associado a um ponto de coleta e um ponto de entrega. Um exemplo deste último tipo é o transporte direto de pessoas ou produtos de um ponto de origem para um ponto de destino, como no caso deste presente trabalho, no qual cada tipo de petróleo tem o ponto de coleta e de entrega determinados (CORDEAU, 2007b; HERNÁNDEZ-PÉREZ, SALAZAR-GONZÁLEZ, 2004; BALDACCI, HADJICONSTANTINO, MINGOZZI, 2003).

Como a maioria das aplicações práticas incluem restrições de janela de tempo e a formulação do PDPTW é de grande utilidade para apresentar o modelo subjacente deste trabalho, é conveniente e ilustrativo apresentar uma caracterização geral do modelo, baseada na formulação apresentada por Cordeau et al. (2007b). Para isto, assume-se que todos os veículos que percorrem a rede são baseados em um único depósito e o PDPTW é definido por um grafo $G = (N, A)$, onde $N = P \cup D \cup \{0, 2n+1\}$, $P = \{1, \dots, n\}$ e $D = \{n+1, \dots, 2n\}$ são os conjuntos de nós. Já o conjunto $A = \{(i, j) : i, j \in N\}$ contém todos os arcos do grafo. Os subconjuntos P e D representam, respectivamente, os pontos de coleta (*pickup*) e entrega (*delivery*). Já os nós 0 e $2n+1$ representam os depósitos de origem e destino, respectivamente. Assim, para cada solicitação i está associado um nó de origem i e um nó de destino $n+i$. Seja K o conjunto de veículos e $m = |K|$. Cada veículo $k \in K$ apresenta uma capacidade Q_k associada e a duração total de sua rota não pode exceder T_k unidades de tempo. Para cada nó $i \in N$ está associada uma carga q_i e um tempo de serviço não negativo d_i tal que

$q_0 = q_{2n+1} = 0$, $q_i = -q_{n+i}$ e $d_0 = d_{2n+1} = 0$. Além disso, para cada nó $i \in N$, está associada uma janela de tempo $[e_i, l_i]$, onde e_i e l_i representam, respectivamente, tempo mais cedo e mais tarde em que o serviço pode ser iniciado no nó i . Para cada arco $(i, j) \in A$ está associado um custo c_{ijk} e um tempo de viagem t_{ij} .

Além disso, para cada arco $(i, j) \in A$ e cada veículo $k \in K$, define-se $x_{ijk} = 1$ se e somente se o veículo k viaja do nó i para o nó j . Para cada nó $i \in N$ e veículo $k \in K$, B_{ik} é o tempo em que o veículo k inicia o serviço no nó i e Q_{ik} é a carga do veículo k após visitar o nó i . Assim, já é possível formular o modelo PDPTW como um problema de programação inteira mista:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ijk} x_{ijk} \quad (2.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1 \quad i \in P \quad (2.16)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} - \sum_{j \in N} x_{n+i, jk} = 0 \quad i \in P, k \in K \quad (2.17)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0, jk} = 1 \quad k \in K \quad (2.18)$$

$$\sum_{j \in N} x_{jik} - \sum_{j \in N} x_{ijk} = 0 \quad i \in P \cup D, k \in K \quad (2.19)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij, 2n+1} = 1 \quad k \in K \quad (2.20)$$

$$B_{jk} \geq (B_{ik} + d_i + t_{ij})x_{ijk} \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.21)$$

$$Q_{jk} \geq (Q_{ik} + q_j)x_{ijk} \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.22)$$

$$B_{ik} + d_i + t_{i, n+i} \leq B_{n+i, k} \quad i \in P, k \in K \quad (2.23)$$

$$B_{2n+1, k} - B_{0k} \leq T_k \quad k \in K \quad (2.24)$$

$$e_i \leq B_{ik} \leq l_i \quad i \in N, k \in K \quad (2.25)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_{ik} \leq \min\{Q_k, Q_{ik} + q_i\} \quad i \in N, k \in K \quad (2.26)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (2.27)$$

A função objetivo (2.16) minimiza o custo total da roteirização. As restrições (2.17) e (2.18) garantem que cada solicitação é servida exatamente uma vez e que a coleta e a entrega são nós visitados pelo mesmo veículo. As restrições (2.19)-(2.21) garantem que a rota de cada veículo k é iniciada no depósito de origem e encerrada no depósito de destino. Em seguida, as restrições (2.22) e (2.23) garantem a consistência dos tempos e o balanço de massa, respectivamente. As restrições (2.24), por sua vez, são responsáveis por garantir que os nós de coleta sejam visitados antes dos nós de entrega. As restrições (2.25) limitam a duração de uma rota e as restrições (2.26) e (2.27) trabalham, respectivamente, com as restrições de janela de tempo e capacidade. Por fim, as restrições (2.28) garantem o domínio da variável de decisão do modelo.

O PDPTW generaliza o TSP e, por isso, é um problema NP-difícil, conforme mencionado anteriormente. Na presença de janelas de tempo, até mesmo encontrar uma solução factível para o problema torna-se NP-difícil, uma vez que a própria factibilidade do TSP com janelas de tempo é NP-completo (SAVELSBERGH, 1985; SAVELSBERGH, SOL, 1995; CORDEAU et al., 2007b).

2.4 Métodos Heurísticos

A programação matemática envolve o estudo de técnicas que podem gerar soluções comprovadamente ótimas para problemas de otimização, chamadas de soluções exatas. Do ponto de vista prático, o campo dos métodos heurísticos tem um objetivo muito semelhante, isto é, gerar soluções para os problemas de otimização. Porém, a diferença reside no fato de que as soluções devem ser boas o suficiente e obtidas em um tempo computacional aceitável para um determinado contexto, mas não necessariamente comprovadas matematicamente como ótimas. As primeiras heurísticas basearam-se na aplicação de técnicas iterativas muito simples que podem construir gradativamente uma solução ou melhorá-la sequencialmente a partir de uma solução inicial viável. A utilização de passos muito simples resultou em algoritmos muito rápidos e como o campo da programação matemática cresceu, algoritmos exatos rápidos foram desenvolvidos para certas classes de problemas práticos. Uma extensão natural da filosofia de projeto de heurísticas foi a de considerar a incorporação

de algoritmos de otimização como sub-processos dentro de um algoritmo mais complexo (BALL, 2011).

2.4.1 Heurísticas clássicas

Duas grandes classes gerais de heurísticas são aplicáveis às soluções de problemas dos tipos descritos até aqui: as heurísticas de construção e as heurísticas de melhoria. As heurísticas de construção iniciam-se a partir de uma solução vazia e prosseguem através de um conjunto de passos, cada um dos quais adiciona um componente para a solução até que uma solução viável completa é gerada. Já as heurísticas de melhoria começam a partir de uma solução viável e iterativamente executam passos de melhoria na solução até que alguma condição de término seja satisfeita (BALL, 2011; VATN, 2007).

Para a primeira classe de heurísticas, as construtivas, Clarke e Wright (1964) propuseram uma das mais conhecidas, denominada “heurística das economias” ou simplesmente “heurística de Clarke e Wright”. Inicialmente, esta heurística busca uma solução na qual todos os clientes (nós) são atendidos diretamente por uma rota individual, a partir do depósito. Ao combinar duas dessas rotas, servindo somente um cliente cada, haverá uma redução de custo denotado por:

$$S_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij} \quad (2.28)$$

onde d_{i0} denota a distância do cliente i ao depósito; d_{0j} representa a distância do depósito ao cliente j e, por fim, d_{ij} representa a distância do cliente i ao cliente j . A figura 2.7 fornece uma visão do procedimento básico da heurística de Clarke e Wright.

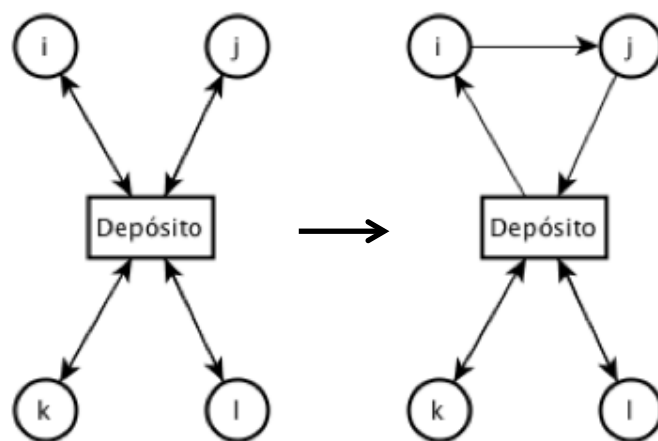


Figura 2.7 – Exemplo de procedimento da heurística de Clarke e Wright

Outra heurística construtiva bem conhecida foi criada por Solomon (1987), conhecida como heurística de inserção de Solomon. Inicialmente, uma rota com um cliente “raiz” é determinado – esta raiz pode ser baseada na maior distância ou nos prazos mais curtos de entrega, por exemplo. Quando uma rota é inicializada, dois critérios $c_1(i, u, j)$ e $c_2(i, u, j)$ são utilizados a cada iteração para decidir qual novo cliente u será inserido na rota parcial atual, entre os clientes adjacentes i e j da rota. A rota atual é sempre denotada por $(i_0, i_1, i_2, \dots, i_m)$ onde i_0 e i_m representam o depósito. Para cada cliente que não foi inserido na rota, realiza-se um cálculo baseado na viabilidade de algum critério, buscando seu mínimo ou máximo, dependendo da situação em questão. Quando nenhuma inserção factível de cliente é encontrada, uma nova rota é iniciada pelo método, ao menos que todos os clientes já tenham sido inseridos na rota.

Da segunda classe de heurística, as de melhoria, Lin (1965) desenvolveu a chamada heurística de troca k -opt, que consiste na troca de k arcos das rotas correntes por k novos arcos. Este procedimento é realizado de forma iterativa, até que a solução não possa ser mais melhorada. Se existem N arcos cobertos por uma determinada rota, há N^k maneiras possíveis de selecionar os k arcos para serem substituídos. No entanto, Potvin e Rousseau (1965) afirmam que a heurística k -opt não se comporta bem com problemas que contemplem janelas de tempo, porque a orientação das rotas é alterada pelas trocas realizadas. Os autores introduziram a heurística de troca 2-opt para lidar com tal problema e também com a questão de múltiplas rotas. O funcionamento primordial desta variação da heurística baseia-se na adição dos últimos clientes de uma rota ao final dos primeiros clientes de outra rota. Em geral, os primeiros clientes são aqueles que tipicamente apresentam as janelas de tempo mais curtas, enquanto que os últimos apresentam janelas de tempo mais longas. A heurística 2-opt é útil também para substituir arcos interligando diferentes rotas.

Uma terceira abordagem heurística baseada no conceito de melhoria, denominada heurística de troca Or-opt, foi também proposta por Potvin e Rousseau (1965). Esta heurística considera um, dois ou três clientes conectados em sequência na solução atual, e busca melhorá-la inserindo cliente(s) em uma nova localidade. Esta heurística, diferentemente das demais apresentadas nessa seção, é focada nos nós do grafo (clientes) ao invés de arcos (caminhos). O Or-opt é um subconjunto de diferentes abordagens k -opt, os quais são mais propensos a serem soluções factíveis, uma vez que somente uma pequena

sequência de clientes adjacentes é movida e inserida na nova localidade, preservando assim a orientação das rotas.

Destaca-se, por fim, que existem inúmeras heurísticas desenvolvidas para o campo de aplicações em logística. Em especial, muitas delas são criadas a partir da combinação de diferentes abordagens, tanto construtiva quanto de melhoria, no intuito de gerar melhores métodos de solução, como mostra Vatn (2007). Além disso, muitas heurísticas podem fazer parte de uma estratégia maior de solução que leva em conta métodos exatos e uma combinação de rotinas computacionais que se complementam, lançando mão de procedimentos específicos de heurísticas bem conhecidas para ganhar velocidade de processamento e ajustes finos em qualidade de solução, conforme explorado na revisão de Ball (2011).

2.4.2 Heurísticas baseadas em programação matemática (MIP-Heuristics)

As heurísticas baseadas em programação matemática, também conhecidas como *MIP-Heuristics* ou heurísticas primais, são procedimentos que podem ser implementados diretamente no método de solução utilizado pelos *solvers* disponíveis em *softwares* comerciais como, por exemplo, *branch-and-bound* ou *branch-and-cut*. O principal objetivo destas heurísticas é justamente buscar caminhos para achar soluções inteiras factíveis e são geralmente utilizadas quando o algoritmo de solução demora muito tempo para encontrar uma solução factível. Estas heurísticas podem ser implementadas em cada um dos nós da árvore gerada pelo método de solução. Neste item, são utilizadas a notação e a representação apresentadas por Pochet e Wolsey (2006) e Wolsey (1998), de tal forma que o problema linear é designado simplesmente por LP (*linear program*), o programa inteiro misto por MIP (*mixed-integer programming*) e um conjunto de variáveis dado por $(x, y) : x \in R_+^n, y \in \{0, 1\}^p$, onde n e p representam, respectivamente, a dimensão do vetor de variáveis reais e inteiras. Assim, a solução ótima de um LP é designada por (\hat{x}, \hat{y}) , enquanto que a melhor solução factível conhecida (incumbente) é dada por (\bar{x}, \bar{y}) .

As *MIP-Heuristics* são também classificadas em construtivas e de melhoria e, além disso, Pochet e Wolsey (2006) apresentam também a classe de heurísticas com estratégias do tipo *diving*. Tipicamente, as heurísticas *LP-and-Fix* (ou *Cut-and-Fix*) e *Relax-and-Fix* são utilizadas para construir soluções iniciais, enquanto que as heurísticas *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS), *Local Branching* (LB) e *Exchange* (EXCH) ou *Fix-*

and-Optimize são heurísticas que buscam melhorias nas soluções factíveis iniciais. Cada uma delas é brevemente descrita neste tópico do trabalho.

A classe de heurísticas conhecidas como *diving* são divididas em dois tipos (*LP-driven* e *IP-driven*) e são, na realidade, uma aplicação da estratégia de busca em profundidade na árvore de *branch-and-cut*. Considere o seguinte MIP $\min\{cx + fy : Ax + By \geq b, x \in R_+^n, y \in \{0,1\}^p\}$. O tipo *LP-driven* utiliza a última solução do LP (\hat{x}, \hat{y}) e fixa a variável que está mais próxima do inteiro, da seguinte forma: seja $F = \{j : \hat{y}_j \notin Z^1\}$, encontra-se $g_k = \min_{j \in F} g_j$ onde $g_j = \min[\hat{y}_j, 1 - \hat{y}_j], j \in F$ e define-se, então o valor $y_k = \begin{cases} 0, & \text{se } \hat{y}_k \leq 0.5 \\ 1, & \text{cc.} \end{cases}$.

Para o tipo *IP-driven*, também conhecido como *guided dives*, a heurística utiliza a solução incumbente (\bar{x}, \bar{y}) para decidir qual variável y_k será fixada e, então, define a direção da ramificação ao impor $y_k = \bar{y}_k$, ou seja, valor igual à solução incumbente. *LP-driven* pode ser considerada uma heurística construtiva, enquanto a *IP-driven* é uma heurística de melhoria. Estas heurísticas encontram-se já eficientemente implementadas em *solvers* comerciais com procedimento de busca em árvore. Em particular, em *softwares* como CPLEX e GUROBI, os parâmetros de busca em árvore podem ser ajustados de acordo com a estratégia adotada para abordar a resolução do modelo. Como este trabalho utiliza o GAMS como linguagem de modelagem que, por sua vez, conecta-se aos *solvers*, é possível manipular estes parâmetros a medida que se ganha um maior conhecimento sobre a estrutura do modelo e das árvores geradas (IBM, 2013b; GUROBI, 2013).

A heurística *LP-and-Fix* é uma heurística baseada em uma ideia similar ao *diving*, porém o método consiste em inicialmente resolver a relaxação linear do problema dado e fixar todas as variáveis que tenham resultado inteiro nesta relaxação. O problema MIP restrito é, então, resolvido por métodos como *branch-and-bound* e *branch-and-cut*. Para ilustrar, seja o conjunto de índices das variáveis y dado por $Q = \{1, \dots, p\}$. Ao fixar as variáveis inteiras, resolve-se o problema resultante dado por:

$$(MIP^{LP-FIX})$$

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b, x \in R_+^n, y \in \{0,1\}^p, y_j = \hat{y}_j, \forall j \in Q \mid \hat{y}_j \in \{0,1\}\}$$

Em geral, a heurística *LP-and-Fix* apresenta soluções melhores quando o problema possui formulações mais apertadas ou as soluções correspondentes ao LP possuem menos variáveis fracionárias. Uma variação desta heurística, denominada *Cut-and-Fix*, é obtida quando aplicada à uma formulação que foi apertada com o uso de cortes ou de uma reformulação estendida.

Na heurística *relax-and-fix*, supõe-se que as variáveis binárias y podem ser particionadas em R conjuntos disjuntos de importância decrescente, dados por Q^1, \dots, Q^R . A partir disto, resolve-se então os R MIPs, denotado por MIP^r , com $1 \leq r \leq R$, para encontrar uma solução heurística para o MIP original.

Na primeira rodada, MIP^1 , impõe-se a integralidade somente às variáveis em Q^1 e relaxa-se a restrição de integralidade das demais variáveis em Q . Assim, esta formulação é dada por:

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b$$

$$x \in R_+^n$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in Q^1$$

$$y_j \in [0,1], \forall j \in Q \setminus Q^1\}$$

Nos MIP^r subsequentes, fixam-se os valores das variáveis y em Q^{r-1} , dados por y_j^{r-1} , em seus valores ótimos obtidos em MIP^{r-1} e adiciona-se a restrição de integralidade para as variáveis em Q^r . Assim, a formulação geral para o MIP^r é dada por:

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b$$

$$x \in R_+^n$$

$$y_j = y_j^{r-1} \in \{0,1\}, \forall j \in Q^1 \cup \dots \cup Q^{r-1}$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in Q^r$$

$$y_j \in [0,1], \forall j \in Q \setminus (Q^1 \cup \dots \cup Q^r)\}$$

No domínio das heurísticas de melhoria, a *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS), proposta por Danna, Rothberg e Pape (2004), explora a vizinha entre a solução do LP, dada por (\hat{x}, \hat{y}) , e a solução incumbente, dada por (\bar{x}, \bar{y}) . Se uma variável y_j apresenta o mesmo valor em ambas as soluções, este valor é fixado. Assim, resolve-se o seguinte MIP:

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b\}$$

$$x \in R_+^n$$

$$y \in \{0,1\}^p$$

$$y_j = \bar{y}_j, \forall j \in Q \mid \bar{y}_j = \hat{y}_j\}$$

Assim, o algoritmo RINS pode ser descrito em três passos simples, dado um nó da árvore *branch-and-cut* :

1. Fixam-se as variáveis que apresentam os mesmos valores na solução incumbente e na solução atual relaxada;
2. Define-se um critério de parada com base no valor da solução incumbente atual;
3. Resolve-se um subproblema com as variáveis remanescentes.

Um dos principais pontos fortes desta heurística é o fato de que ela é capaz de explorar a vizinhança tanto da solução incumbente quanto da relaxação e pode ser vista como uma versão de melhoria da heurística *Cut-and-Fix*. Ela também se encontra eficientemente implementada em pacotes comerciais e pode ter seus parâmetros definidos antes da execução do modelo. Em geral, definem-se dois parâmetros - um para a frequência de aplicação de RINS na árvore gerada (p.ex. a cada 100 nós) e outro restringe o número de nós buscados no subproblema gerado (DANNA, ROTHBERG, PAPE, 2004; IBM, 2013b; GUROBI, 2013).

A heurística *Local Branching* (LB), proposta por Fischetti e Lodi (2002), constrói uma vizinhança utilizando a solução incumbente. Um valor inteiro k é escolhido e a vizinhança consiste em todos os y vetores que não diferem de \bar{y} em mais de k coordenadas. Este parâmetro k é também conhecido como “raio da vizinhança”. Então, o MIP a ser resolvido é dado por:

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b\}$$

$$x \in R_+^n$$

$$y \in \{0,1\}^p$$

$$\sum_{j \in Q: \bar{y}_j=0} y_j + \sum_{j \in Q: \bar{y}_j=1} (1 - y_j) \leq k\}$$

Existem variações desta heurística, na qual são considerados, por exemplo, subconjuntos de Q ou distinções em importância com relação às variáveis fixadas no valor 0 e

no valor 1. Nos *solvers* comerciais, em geral, pode-se aplicar o LB simplesmente ativando o parâmetro adequado que, por padrão, encontra-se desabilitado (IBM, 2013b).

Por fim, a heurística *Exchange* (EXCH), também conhecida como *Fix-and-Optimize*, apresenta uma versão de melhoria da heurística *Relax-and-Fix*. Nesta heurística, mantém-se a mesma decomposição de variáveis em conjuntos Q^r , com $1 \leq r \leq R$. A cada passo r , todas as variáveis inteiras são fixadas em seus valores da melhor solução (\bar{x}, \bar{y}) encontrada até então, exceto as variáveis em Q^r , que ficam restritas a assumir valores inteiros. Resolve-se, então, o MIP definido no passo r como:

$$\min\{cx + fy : Ax + By \geq b$$

$$x \in R_+^n$$

$$y_j = \bar{y}_j, \forall j \in Q \setminus Q^r$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \forall j \in Q^r\}$$

É importante notar que diferentes passos r com $1 \leq r \leq R$ são independentes uns dos outros e qualquer subconjunto de passos pode ser realizado em qualquer ordem.

Estas heurísticas baseadas em programação matemática são amplamente utilizadas em contextos de planejamento e programação da produção, com diversas e ricas aplicações. No entanto, ao explorar as aplicações destas heurísticas no contexto de roteirização e programação de veículos na etapa de revisão bibliográfica desta pesquisa, foi encontrado apenas um trabalho apresentado por Uggen, Fodstad e Nørstebø (2011). Os autores afirmam também que não encontraram nenhum trabalho na literatura que realizasse a aplicação destes métodos em problemas de roteirização.

Neste trabalho, os autores aplicam uma heurística denominada *fix-and-relax*, descrita por Dillenberger et al. (1994) em um contexto de roteirização de estoques de gás natural liquefeito (LNG) utilizando navios. A heurística *fix-and-relax* diferencia-se da *relax-and-fix* mais geral proposta por Wolsey (1998) e descrita anteriormente pelo fato de não particionar as variáveis em ordem de importância. Pouca ênfase é dada na descrição do modelo matemático utilizado, que se baseia nos trabalhos de Fodstad et al. (2010) e Grounhaug e Christiansen (2009). Os autores desenvolvem duas extensões para esta heurística, com vistas a melhorar o tempo computacional e melhorar a qualidade da solução após a primeira solução factível ser encontrada. A primeira delas é baseada na construção de um novo bloco de variáveis no horizonte de planejamento, denominado *end block*, no qual o

modelo sofre uma relaxação linear, um corte de horizonte ou ainda é reformulada para um problema mais fácil de ser resolvido (*light model*). A segunda extensão diz respeito à introdução de uma fase de melhoria (*improvement phase*) na qual se utilizam soluções existentes com todas as variáveis inteiras fixadas e percorrem-se m intervalos de tempo em ordem consecutiva, removendo-se a fixação das variáveis em cada intervalo. Depois disso, o problema é re-otimizado.

Este cenário de pouca exploração das *MIP-Heuristics* para contextos de roteirização não ajudou a aplicar estes métodos no problema tratado por este presente trabalho. Um dos prováveis motivos para esta escassez de trabalhos na literatura é que estas heurísticas lidam muito bem com problemas que discretizam o tempo em períodos definidos, por ser este um particionamento clássico para a aplicação delas, o que não é o caso de problemas de roteirização. As abordagens de roteirização consideram o tempo contínuo e isto se configura como um dos principais desafios no desenvolvimento e implementação destas heurísticas para o problema deste trabalho.

2.5 Modelos de roteirização e programação de veículos aplicados ao transporte marítimo

Nesta seção, pretende-se revisar sucintamente os principais trabalhos publicados na literatura acadêmica sobre aplicações de modelos de roteirização e programação de veículos especificamente ao transporte marítimo. Foram valorizados, no decorrer da revisão bibliográfica, aqueles artigos que apresentaram maior aderência e potencial em descrever o problema considerado neste trabalho. Assim, foram incluídos artigos clássicos da área, artigos com forte enfoque em aplicação prática e trabalhos que focavam no transporte de *commodities*, com destaque especial para petróleo. A apresentação destes trabalhos é realizada respeitando-se a ordem cronológica de publicação, da mais antiga para a mais recente, varrendo-os com destaque para os principais aspectos da aplicação e estratégias de modelagem e solução.

Um dos primeiros trabalhos pioneiros na área foi o de Dantzig e Fulkerson (1954), no qual os autores aplicam um método baseado em otimização linear para realizar a programação de navios da marinha americana, utilizados para transporte de combustível. O objetivo do modelo é minimizar o número de navios que compõem a frota total. Segundo o exemplo exibido no artigo, os instantes de coleta e entrega dos combustíveis são pré-

determinados. Outro trabalho que também pode ser considerado dentre os pioneiros é o apresentado por Flood (1954), no qual é realizado o transporte de petróleo por meio de uma frota militar, cujo objetivo é minimizar a distância média de navios que viajam vazios. O horizonte de planejamento é de um ano e um modelo de programação linear com 6 pontos de carregamento nos Estados Unidos e 15 pontos de entrega ao redor de todo o mundo foi empregado.

Briskin (1966) apresenta um estudo para a determinação de datas e volumes de entrega de petroleiros, baseada em uma formulação de *scheduling* com rotas pré-definidas. O autor considera múltiplos pontos de entrega, nos quais é possível descarregar a carga do navio parcialmente. Assim, é utilizada uma estratégia de *cluster* para agrupar os principais pontos de descarregamento com o intuito de gerar um plano de entregas com o suporte de programação dinâmica. Pouco tempo depois, Bellmore, Bennington e Lubore (1968) propõem uma reformulação do problema apresentado por Dantzig e Fulkerson (1954), na qual os autores consideram uma frota insuficiente de veículos para atender as demandas, de tal forma que algumas delas precisam ser canceladas. Assim, o objetivo do trabalho é determinar o máximo fluxo pelo grafo com mínimo custo, baseado na formulação do Problema de Transbordo (*transshipment problem*) e o método de solução é construído com base em um algoritmo exato.

Appelgren (1969) é considerado também um artigo clássico da área de roteirização marítima devido aos avanços em métodos que proporcionou. O autor aborda o problema de atribuição de cargas a navios, com o objetivo de minimizar o custo. Algumas características do problema abordado incluem janela de tempo para carregamento e descarregamento e frota heterogênea de navios. No artigo, assume-se que cada navio não carrega mais do que uma carga de cada vez. Os custos de viagem incluem custos portuários, de canais, carregamento, descarregamento, bem como a velocidade e consumo de combustível do navio. O horizonte de planejamento considerado é de 2 a 4 meses e inclui um custo de “*time value*”- o que significa utilizar, na prática, os navios menores com restrição de capacidade de carga, deixando os navios menos restritos para outras oportunidades de carga que venham a surgir ao longo do horizonte. Para solucionar o problema, o autor apresenta um modelo baseado em *multicommodity flow*, e aplica decomposição de Dantzig-Wolfe e geração

de colunas. O subproblema a ser resolvido é um problema de caminho mínimo³. Resultados computacionais com 40 navios e 50 cargas são apresentados, e observa-se que soluções fracionárias podem ocorrer em 1 ou 2% dos casos testados. Uma extensão deste artigo é proposta em Appelgren (1971), no qual o autor propõe dois métodos baseados em técnicas de Programação Inteira para resolver o problema de programação de navios. O primeiro método é baseado em planos de corte – que não obteve soluções boas - e o segundo método é baseado em *branch-and-bound* aplicado ao nó inicial, o qual apresentou resultados mais relevantes para o problema.

Em Bellmore, Bennington e Lubore (1971), os autores também propõem uma extensão do trabalho de Dantzig e Fulkerson (1954), no qual é considerada uma frota heterogênea de navios e a relaxação de um programa fixo de visitas. Além disso, os autores consideram também a possibilidade de carregamento parcial dos petroleiros. O método de solução baseia-se em *branch-and-bound* em conjunto com uma estratégia de decomposição do problema em sub-grafos.

Em McKay e Hartley (1974), os autores tratam do problema de transporte de petróleo em navios militares ao redor do mundo. O objetivo é realizar a programação e roteirização dos navios de forma a minimizar os custos de transporte, considerando janelas de tempo para a entrega dos produtos e carregamento de múltiplos produtos. Um primeiro modelo de programação linear inteira é proposto, mas devido a sua complexidade computacional, o modelo é posteriormente simplificado. Neste primeiro modelo, as principais variáveis de decisão do modelo referem-se ao número de visitas que um determinado navio faz em um dado ponto de carga ou descarga. No segundo modelo mais simplificado, as possíveis rotas de cada navio são pré-geradas, eliminando rotas que não são consideradas viáveis para o problema prático. Desta forma, as variáveis de decisão do segundo modelo constituem-se das possíveis rotas que um navio irá utilizar. Em Ronen (1986), o autor estuda uma programação de curto prazo para uma frota heterogênea de navios que transportam *commodities* e está sujeita a custos de tempo de utilização e tarifas dos portos, conjunto que deve ser minimizado. O autor analisa diversos algoritmos de alocação de carregamentos aos navios, com vistas à programação diária, e alcança um bom desempenho computacional com algoritmos baseados em vieses aleatórios.

³ Segundo Ahuja et al. (1995), o problema do caminho mínimo consiste em encontrar um caminho de custo (comprimento) mínimo a partir de um nó origem s até um nó destino t em uma rede direcionada ou não-direcionada, na qual cada arco apresenta um custo associado.

No importante trabalho proposto por Brown, Graves e Ronen (1987), aborda-se o problema de transporte de óleo cru para exportação, fluindo de países situados no Oriente Médio com destino a países da Europa e América do Norte. Um modelo baseado em *set partitioning* é proposto com o objetivo de encontrar as velocidades ótimas dos navios, otimizando custos. Diversos custos, como os de oportunidade, portuários e de canais, atraso na entrega do navio (quando terceirizado) e consumo de combustível são considerados no modelo matemático. Apesar de tratar-se de uma frota heterogênea, os autores assumem a abordagem de frota homogênea, pois as diferenças entre os navios são consideradas muito pequenas. Trata-se também, neste trabalho, as restrições do navio com respeito a quais portos podem ser utilizados e se é possível ou não passar pelo canal de Suez, uma vez que este é um caminho extremamente utilizado por rotas entre os países tratados. O modelo também contempla datas de entrega para carregamento e descarregamento, considerando um horizonte de planejamento de 3 meses. Viagens entre pontos de operação podem demorar de 2 dias a 2 meses e geralmente apresentam um único ponto de partida e um único ponto de chegada, porém algumas delas permitem carregamento ou descarregamento em até dois portos adjacentes. No modelo proposto, os programas viáveis para cada navio são representados nas colunas do modelo, e as variáveis de decisão são binárias e indicam se um determinado programa foi selecionado ou não. Soluções para o problema são obtidas via geração de colunas. Testes computacionais são apresentados para problemas com 50 cargas, 12 portos, 24 navios, e resolvidos em poucos minutos.

O trabalho apresentado por Perakis e Bremer (1992) representa uma situação de programação de navios petroleiros fortemente prática, embasada pelo estudo de caso na empresa Chevron, sobre a qual os autores realizam uma apresentação bastante ilustrativa das principais operações da companhia. O artigo endereça os movimentos de petróleo entre a África Ocidental e a Costa Leste Americana que são ditados pelas requisições da refinaria, a um nível tático de planejamento. A cada um dos portos em que são realizados os carregamentos ou descarregamentos é associada uma janela de tempo. O objetivo do modelo desenvolvido é minimizar os custos associados à operação da frota própria somada àqueles decorrentes de sua terceirização, com foco no curto prazo e incluindo custos de oportunidade. A sua formulação matemática é baseada em Appelgren (1971) e os autores utilizam um algoritmo inicial, chamado de “gerador de *schedule*”, para gerar programas factíveis antes de aplicar um modelo baseado em programação inteira.

Haugen (1996) é um dos trabalhos pioneiros em aplicar programação dinâmica estocástica à distribuição de gás natural pela Europa. O modelo desenvolvido pelo autor é fortemente baseado na abordagem de programação de projetos e o termo *Stochastic Project Scheduling Problem* é utilizado para se referir ao problema estudado. Os campos de produção de gás natural são tratados como perfis de produção diferentes, que são vistos como variáveis estocásticas. Assim, são consideradas incertezas na disponibilidade de recursos e o objetivo é minimizar o desvio-padrão esperado para um dado contrato de perfil de produção. Por fim, há uma ênfase no desempenho computacional e complexidade dos modelos.

Sherali, Al-Yakoob e Hassan (1999) tratam do problema de programação de navios de uma empresa de petróleo no Kuwait para exportação de óleo cru e seus derivados para países na América do Norte, Europa e Japão. O trabalho é fortemente baseado em Brown, Graves e Ronen (1987). A frota de navios é heterogênea, a qual parte dela é composta por navios terceirizados. Outra característica do problema é que os navios são compartimentados, e podem carregar produtos diferentes em cada um de seus compartimentos. Cada viagem tem uma única origem e um único destino e existem janelas de tempo para coleta e entrega dos produtos. Os autores aplicam penalidades por atraso na entrega dos produtos e por exceder a quota pré-determinada de exportação imposta pela OPEC (*Organization of the Petroleum Exporting Countries*) como critérios a serem minimizados. Além disso, os custos de fretamento de navio, tempo de viagem e atravessamento do canal de Suez são considerados no modelo. Uma característica de destaque é que o problema pode ser resolvido novamente antes do final do horizonte de tempo considerado, em face de novos pedidos ou alterações nos pedidos já existentes, o que o caracteriza com um modelo que lida com a natureza dinâmica do problema tratado. O artigo propõe um modelo exato, que é posteriormente simplificado e resolvido com uma heurística baseada em horizonte de tempo rolante. As rotas pré-geradas são basicamente aquelas que consideram atravessar diretamente o canal de Suez ou contornar o Cabo da Boa Esperança, no sul da África. Testes computacionais comparam as soluções geradas pela heurística proposta com soluções obtidas pelos programadores de navios, e mostram significativo ganho. O método foi capaz de resolver problemas com até 20 navios, horizonte de tempo de 90 dias e 4 portos em tempo computacional viável. No trabalho como um todo, mais de 100 navios são considerados, cada um com 6 a 8 compartimentos.

Christiansen (1999) aborda o problema integrado de escoamento de amônia com estoques na oferta e na demanda da empresa Norsk Hydro ASA. Várias fábricas no norte da Europa tanto produzem quanto consomem amônia e isto as caracterizam simultaneamente

como pontos de coleta e entrega. O problema é transportar a amônia dos portos de oferta para os portos de demanda, utilizando uma frota dedicada de navios. As taxas de produção e consumo são previamente conhecidas e estáveis e os estoques têm níveis máximos que devem ser respeitados, e níveis mínimos de segurança na demanda, que geram penalidades se forem ultrapassados. Todas as entregas devem respeitar as janelas de tempo, que são transformadas em nós da rede, fazendo com que o navio deva visitá-los. Assim, a autora classifica o problema como um IPDPTW (*Inventory Pickup and Delivery Problem with Time Windows*). As rotas são previamente conhecidas e o problema consiste em decidir se o navio transporta uma determinada quantidade em uma rota específica, minimizando o custo total de transporte. O trabalho propõe um modelo matemático, que é posteriormente reescrito para poder ser resolvido pelo método de geração de colunas. Para cada navio, são gerados os nós da rede a serem visitados e então, encontra-se a rota de caminho mínimo utilizando os métodos clássicos de programação dinâmica. Para resolver o modelo matemático, foi utilizado o pacote de otimização denominado SCICONIC. Foram criados vários cenários como exemplos de aplicação, variando o tamanho do problema e o tamanho das janelas de tempo. Em alguns casos não foi encontrada a solução ótima, e o maior tempo computacional imposto para as rodadas das instâncias foi de 2 horas.

Lasschuit e Thijssen (2004) apresentam um modelo de programação não-linear inteiro misto para o planejamento estratégico de cadeia de suprimentos global da indústria química e de petróleo, envolvendo decisões de alocação de recursos, modais de transporte e desenho da rede de plantas de manufatura. Todo trabalho é baseado na operação que os autores coordenam na Shell Global Solutions, baseada na Holanda. O conjunto de ferramentas computacionais utilizadas pelos autores é conhecido como GMOS/NetSim (*Global Manufacturing and Logistics Optimization System/ Network Analysis and Supply Chain Optimization System*). O escopo principal do artigo é oferecer uma visão de integração entre estratégias de cadeia de suprimentos e a utilização de planejamentos baseados em modelos de otimização, principalmente no que se refere ao transporte utilizado para os produtos.

Persson e Göthe-Lundgren (2005) estudam a programação de navios da empresa Nynas para escoamento de betume. A empresa possui 3 refinarias de produção de betume na Suécia e uma em Antuérpia, na Bélgica, que deve ser escoado para 15 depósitos no norte da Europa. A frota de navios é própria e não varia ao longo do horizonte de planejamento. Os navios possuem vários compartimentos, podendo entregar produtos diferentes na mesma viagem - o betume a ser escoado é formado por três produtos diferentes.

Deve-se decidir as rotas dos navios que são previamente geradas e as quantidades a serem transportadas com penalidades se ocorrer falta de produto nos depósitos, que apresentam capacidade limitada. Uma particularidade da abordagem dos autores é que eles dividem as rotas em dois tipos: *outbound trip*, que é a viagem da refinaria para os depósitos, que são duas por viagem, no máximo, e a *inbound trip*, que é a viagem de volta do depósito para as refinarias. É proposto um modelo matemático que utiliza desigualdades válidas e geração de colunas como métodos de solução, com o CPLEX 7.0 como *solver*. Os exemplos são testados para horizontes de tempo de 42 semanas, divididas em unidades discretas de 6 horas. São encontradas soluções ótimas em até 3 horas de processamento. Os autores fazem vários testes comparando o desempenho computacional quando só utilizado o método de geração de colunas, somente as desigualdades válidas ou ambos os métodos simultaneamente. De modo geral, os exemplos em que são utilizados os dois métodos simultaneamente são mais eficientes do que os outros casos com os métodos separados.

O trabalho de Al-Khayyal e Hwang (2007), baseado na tese de doutorado de Hwang (2005), apresenta um modelo de *Pickup and Delivery* para o transporte marítimo de vários tipos de líquido a granel, o que o torna apropriado para diversas aplicações na indústria química, incluindo a de petróleo. Os autores apresentam um importante conceito dentro deste tema – a diferenciação entre problemas do tipo *inventory routing*, também conhecido como IRP (*Inventory Routing Problem*) e problemas do tipo *cargo routing*. O primeiro é utilizado para problemas em que as cargas são definidas pelo próprio planejamento do processo produtivo, enquanto que o segundo refere-se à roteirização de cargas pré-definidas como entradas para o planejamento do processo. O problema considera frota heterogênea e os compartimentos do navio, de tal forma que o objetivo é decidir qual é a quantidade de cada produto que deve ser alocada em cada um dos compartimentos para ser transportada entre pontos de coleta e entrega. Um aspecto importante deste trabalho é a consideração explícita das taxas de consumo e produção nos pontos de entrega e coleta, respectivamente, além de capacidades de estocagem dos vários produtos em cada um dos portos visitados. Esta consideração traz um alto grau de complexidade para a formulação do problema, que é modelado como um programa inteiro misto não-linear. No entanto, grande parte do trabalho dos autores é concentrada em apresentar e demonstrar a reformulação do modelo para um programa linear inteiro misto, valendo-se de estruturas especiais do problema. Mais de 100 testes são gerados aleatoriamente e rodados em CPLEX 7.5, os quais provam a complexidade do problema e abrem caminho para explorar algumas estruturas especiais da formulação

matemática com vistas a resolver problemas maiores. O tempo computacional cresce exponencialmente com a adição de visitas aos portos e uma análise detalhada dos resultados computacionais obtidos pelos autores sugere que, a partir de um número pequeno de visitas possíveis e um aumento seletivo de sua quantidade, pode resultar em um procedimento robusto de solução. Dentro desta classificação proposta por Al-Khayyal e Hwang (2007), o presente trabalho pode ser classificado como roteirização de cargas (*cargo routing*), uma vez que as cargas de petróleo estão previamente definidas entre pares de origem (plataforma) e destino (terminal).

Gribkovskaia, Laporte e Shlopak (2008) apresentam uma série de heurísticas construtivas e um algoritmo baseado em busca tabu para o problema *Single Vehicle Pickup and Delivery with Capacitated Customers* aplicado ao provisionamento de plataformas de petróleo e gás no Mar da Noruega, com uma base de operações localizada na cidade de Haltebanken, que serve 9 plataformas na região. Geralmente, as plataformas demandam suprimentos dos mais variados tipos para serem entregues a partir de uma base em terra. Por outro lado, as plataformas também retornam muitos materiais para a base, como lixo, contêineres vazios e equipamentos alugados. Apesar deste serviço ser realizado por 3 navios, cada um com capacidade para servir de 6 a 9 plataformas em uma única rota, o planejamento é realizado para um navio por vez, o que leva os autores a utilizar a abordagem de veículo único (*single vehicle*). O objetivo é desenhar uma rota de custo mínimo que tenha como início e fim a base em Haltebanken, visitando todas as plataformas de forma a respeitar o estoque máximo dos navios e das plataformas para acomodar todos os materiais que precisam ser coletados ou entregues. Os testes computacionais demonstram que a aplicação inicial de busca tabu, associada à heurística construtiva desenvolvida pelos autores, gera as melhores soluções obtidas a partir dos testes, dependendo das localizações relativas das plataformas e da demanda em cada uma delas.

Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009) apresentam um modelo matemático para o problema de alocação de petróleo para um processo logístico da Petrobras, que integra dois subproblemas: decisões de programação de estoques e navios e planejamento de operações nas refinarias. Os autores escolheram a abordagem integrada do problema, que se caracteriza como de grande escala e, para isso, foram necessárias várias simplificações para torná-lo tratável. Mesmo após grandes tentativas em gerar formulações apertadas, soluções factíveis não foram encontradas após 15 dias de execução computacional. O objetivo do modelo é minimizar os custos totais, que envolvem a própria operação da frota, custos de

estoque e penalidades por desvios do planejamento, como também custos relacionados à adição de navios à frota. O modelo leva em consideração as taxas de consumo e produção e capacidades de estocagem. Assim, o modelo linear inteiro misto obtido foi implementado em XPRESS, mas para problemas de tamanho real não foi possível encontrar soluções factíveis. Então uma heurística baseada em busca local foi incorporada ao procedimento de solução. Este procedimento é baseado, inicialmente, na determinação de quais navios e em quais períodos de tempo o petróleo será transportado das plataformas para os terminais. O segundo passo é resolver o problema inteiro com as variáveis fixadas de acordo com o funcionamento anterior da heurística e, por fim, o último passo é aplicar busca local para o problema original com a solução inicial encontrada no segundo passo. O algoritmo foi testado com exemplares reais e mostraram resultados com *gap* inferior a 10% em menos de 5 horas. Além disso, foi mostrado que a busca local é um importante passo para achar boas soluções em problemas de larga escala. O trabalho apresentado por Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009) diferencia-se deste presente estudo basicamente pelo fato de aplicar uma visão de integração entre planejamentos de diferentes esferas, em particular, o tático e o operacional, focando na alocação da produção de petróleo ao longo do tempo. Em uma análise comparativa, é possível afirmar que sua solução definiria parâmetros de entrada para o modelo apresentado nesta dissertação, por estar operando em um nível diferente de planejamento e tomada de decisão.

O trabalho de Brønmo, Nygreen e Lysgaard (2010) apresenta o método de decomposição de Dantzig-Wolfe para a programação de navios nos quais a carga apresenta flexibilidade em termos de quantidade. A abordagem utilizada pelos autores é baseada no PDPTW clássico, com a alteração de que as cargas são agora representadas por intervalos, e não mais por valores fixos. Assim, uma implicação direta desta consideração são as janelas de tempo de carregamento e descarregamento que agora dependem diretamente da quantidade que o navio está carregando. Os autores reportam a dificuldade em encontrar soluções exatas para os subproblemas gerados e, então, comparar a aplicação da decomposição de Dantzig-Wolfe com resultados obtidos *a priori* com a geração de colunas.

No estudo de Kobayashi e Kubo (2010), os autores realizam a programação operacional de uma frota de cabotagem de navios que deve entregar petróleo nos portos do Japão. A frota de navios é própria, mas pode-se afretar mais navios para viagens específicas, conforme demanda. Os autores descrevem o problema como coleta e entrega multi-veículos com janelas de tempo e com restrições de alocação. Uma particularidade do problema é o fato de que os portos fecham para operações de carregamento e descarregamento durante a noite, o

que faz com que as janelas de tempo se estendam para vários dias e passam a ser tratadas como múltiplas janelas. Como o contexto real do problema estudado é bastante incerto, os autores propõem penalizar a função objetivo conforme a programação do navio se aproxima do final da janela de tempo. O objetivo do modelo é minimizar o custo total de operação. O problema é modelado matematicamente e decomposto em dois subproblemas. Inicialmente, são pareadas todas as demandas e ofertas, utilizando uma heurística criada pelos autores que, basicamente, ordena os portos a serem visitados conforme o dia de carregamento e descarregamento, respeitando as restrições do problema. Posteriormente, é gerado um roteiro para cada navio percorrer, iniciando em um porto e terminando em outro qualquer. Para resolver o segundo problema, é usada geração de colunas e são propostos quatro exemplos numéricos para testar o problema, resolvidos no XPRESS. As soluções apresentaram redução média de 15% no custo total, e foram encontradas em até 5 minutos.

Em Andersson et al. (2010), os autores apresentam uma revisão bibliográfica de problemas de IRP integrados com gestão de estoque, valorizando os aspectos práticos de aplicações industriais para os modais marítimos e terrestres. Os autores partem das definições de tipos de cadeia de suprimentos e constroem uma visão integrada sobre os processos de estoque e roteirização. Desta forma, a classificação dos problemas é baseada nas características de tempo, demanda, topologia, roteirização, estoque, composição e tamanho de frota de veículos. Dentro deste contexto, o presente trabalho poderia ser classificado como: tempo finito, demanda determinística, topologia *many-to-many* (muitos navios podem carregar e descarregar em muitos pontos), roteirização contínua (classificação dada para problemas do tipo coleta e entrega), estoque fixo (o valor nunca é menor do que um estoque de segurança) e, por fim, frota heterogênea e limitada. Um dos principais objetivos do estudo é fornecer a praticantes do mercado uma visão pragmática das principais aplicações de IRP para contextos industriais, estimulando a adoção de sistemas de suporte à decisão baseados em otimização. O artigo sistematiza uma classificação dos problemas, que serve como base de apresentação dos principais trabalhos publicados na área.

Hoff et al. (2010) também apresentam uma revisão bibliográfica, como uma continuação do trabalho de Andersson et al. (2010). Neste trabalho, no entanto, o foco da revisão e classificação de modelos é em estudos que integram problemas de roteirização de veículos com composição de frota. Destaca-se que os três principais aspectos enunciados pelos autores e considerados para determinar a heterogeneidade de uma frota (dimensões físicas, restrições de compatibilidade e custos) são contemplados no modelo apresentado nesta

dissertação, em forma de parâmetros e restrições que serão apresentados. Os autores apresentam também uma visão industrial dos modelos de roteirização, apresentando alguns casos do modal marítimo.

Hennig et al. (2012) tratam do problema de transportar óleo cru entre pontos de oferta e portos de demanda, com o objetivo de encontrar rotas de navios, tempos de chegada e partida nos portos, de forma a minimizar custos de transporte. O trabalho trata do caso de Coleta e Entrega (*Pickup and Delivery*), em que fracionamento arbitrário das cargas é permitido, caracterizando o modelo PDPSL, descrito anteriormente. O artigo considera custos relativos ao consumo de combustível de acordo com a velocidade do navio e custos de carregamento e descarregamento. Um modelo de programação linear inteira é proposto, no qual as janelas de tempo são representadas como nós de uma rede a serem visitados. Variáveis contínuas são utilizadas para distribuir as cargas para os navios e para assegurar que as restrições de tempo e carga são satisfeitas, enquanto que as variáveis binárias são utilizadas para determinar se um navio usa certa rota ou não. As rotas são pré-geradas, de tal forma que muitas são eliminadas por regras óbvias de operação e outras por regras criadas pelos autores para que o problema não ganhe alta escala. Por tratar-se de um trabalho inserido em contexto prático, os autores empenham um razoável esforço em descrever o processo de geração de rotas e as premissas e condições consideradas, com foco na operação real. Os testes computacionais foram realizados com instâncias pequenas com, por exemplo, 2 navios, 2 pontos de carregamento e 5 pontos de descarregamento, que apresentaram bom desempenho computacional. Este trabalho difere do trabalho desta presente dissertação por permitir separação das cargas e por gerar previamente as rotas para os navios. No trabalho de Hennig et al. (2012), apenas os pares de coleta e entrega são previamente conhecidos e a construção da rota é uma decisão do modelo.

Stålhane et al. (2012) apresentam um método de *branch-price-and-cut* para resolver um PDPSL no contexto marítimo. A frota considerada é heterogênea e fixa para um dado horizonte de planejamento, sem a consideração de depósitos comuns para os navios. Uma particularidade deste estudo é a consideração de cargas obrigatórias e opcionais nas operações de coleta e entrega, e cada uma das cargas pode ser fracionada em vários navios. O objetivo do modelo é encontrar uma rota para cada um dos navios da frota, de forma a maximizar o lucro total obtido ao transportar todas as cargas obrigatórias e um subconjunto de cargas opcionais. Os autores utilizam a formulação de *path flow* com um subproblema que se caracteriza como uma variante do problema de caminho mínimo (*shortest path problem*) com

restrições de recursos e aplicação de um problema da mochila⁴ (*knapsack problem*) multidimensional para alocar as quantidades ótimas de carga. Por fim, os autores desenvolvem algumas novas desigualdades válidas e aplicam outras desigualdades já conhecidas da literatura para resolver problemas semelhantes.

Song e Furman (2013) exploram a ideia de que a complexidade do IRP resulta em poucos exemplos de aplicações de sucesso do modelo em contextos práticos. Assim, os autores propõem um *framework* flexível para guiar a aplicação de modelos baseados em IRP incorporando várias funcionalidades práticas. A modelagem do problema é baseada na abordagem de *multi-commodity flow*, denominada *time-space network*, no qual os navios desempenham o papel das *commodities* e os nós representam uma possível visita a um porto, dentro de um horizonte de tempo. Os autores apresentam uma heurística baseada em um método de busca em vizinhança, utilizando a solução factível inicial gerada pelo CPLEX como ponto de partida e aplicando um método de solução baseado em *branch-and-cut*.

Christiansen et al. (2013) elaboraram o mais recente levantamento bibliográfico que se tem conhecimento neste estudo. Os autores elaboraram uma extensiva revisão dos problemas de roteirização e programação de navios e problemas correlatos e apresentam quatro modelos matemáticos básicos que ilustram os principais domínios da área. Um resultado encontrado pelos autores é que tanto as publicações decorrentes de pesquisa nesta área, quanto os canais de pesquisa, dobram a cada década. A apresentação dos principais modelos é dividida nos modos de operação *liner*, *tramp* e industrial. Ao apresentar os aspectos industriais, os autores se baseiam na formulação PDPTW, apresentada por Desroisiers et al. (1995) e nas definições dadas por Al-Khayyal e Hwang (2007), dois dos trabalhos que influenciaram o desenvolvimento do modelo apresentado nesta dissertação. Os autores salientam duas áreas de trabalho que ainda necessitam ser propriamente exploradas e tratadas pela literatura. A primeira delas é o projeto da rede de operações do tipo *liner*, que se aplica a grandes operadores logísticos de carga marítima que controlam um grande número de navios e servem centenas de pontos de origem-destino. Este problema deve ser explorado, segundo os autores, principalmente devido ao seu grande impacto econômico. Já a segunda área apontada pelo trabalho é a de combinar a roteirização e a programação de navios com a gestão dos portos, tais como a alocação de berços, por exemplo. Este contexto é aplicado a

⁴ De acordo com Bertsekas (1998), o problema da mochila consiste em maximizar o valor de um subconjunto de objetos que devem ser posicionados dentro de uma mochila, a partir de uma coleção de objetos, respeitando a carga máxima suportada pela mochila. É um sub-problema recorrente em muitas abordagens de Pesquisa Operacional.

companhias que gerenciam tanto a frota de navios quanto os terminais e, portanto, possui grande poder de decisão acerca desta integração.

Dentre todos os trabalhos revisados neste estudo, destaca-se o de Christiansen (1999), que apresenta um problema de coleta e entrega de amônia considerando janelas de tempo, rotas pré-definidas e minimização de custo de transporte. Este trabalho ofereceu visões particulares sobre a modelagem geral do problema apresentado nesta dissertação, apesar de não se tratar do mesmo produto e não incorporar explicitamente os estoques, como é feito no trabalho revisado. Além disso, o trabalho de Al-Khayyal e Hwang (2007) também contribuiu para fornecer estratégias de modelagem, considerando frota heterogênea e roteirização de carga. Porém, neste presente trabalho, ao contrário do apresentado pelos autores, não são considerados os compartimentos dos navios e as decisões de quantidade a ser carregada. Outro trabalho relevante para o desenvolvimento desta dissertação foi o apresentado por Rocha, Grossman e Poggi de Aragão (2009), por tratar-se de um problema que possui alta relação com as decisões do presente modelo proposto, do ponto de vista de planejamento integrado e contextualização organizacional do estudo de caso. Por fim, o trabalho de Hennig et al. (2012) forneceu indícios importantes sobre a roteirização aplicada especificamente ao modal marítimo no transporte de petróleo. Apesar de considerar a separação de carga, os autores apresentam um procedimento de pré-geração de rotas que foi particularmente inspirador para determinar alguns procedimentos deste trabalho.

O quadro 2.2 fornece um resumo das principais características dos trabalhos apresentados nesta revisão bibliográfica.

Quadro 2.2 - Resumo dos principais trabalhos da literatura para roteirização aplicada ao modal marítimo

Autor	Aplicação	Método / Modelo
Dantzig e Fulkerson (1954)	Programação de navios da marinha americana	Otimização linear
Flood (1954)	Transporte de petróleo por uma frota militar americana	Otimização linear
Briskin (1966)	Determinação de datas e volumes de entrega para petroleiros	<i>Scheduling</i> com rotas pré-definidas
Appelgren (1969)	Atribuição de cargas a navios com minimização de custo	<i>Multicommodity flow</i> , decomposição Dantzig-Wolfe e geração de colunas
Appelgren (1971)	Extensão do artigo de 1969	Método baseado em planos de corte e <i>branch-and-bound</i>
Bellmore, Bennington e Lubore (1971)	Extensão do trabalho de Dantzig e Fulkerson (1954) com frota heterogênea	Relaxação de programa fixo de visitas, decomposição em sub-grafos e <i>branch-and-bound</i>

McKay e Hartley (1974)	Transporte de petróleo em navios militares ao redor do mundo	Programação inteira mista e variações com rotas pré-definidas
Ronen (1986)	Programação de curto prazo para transporte de <i>commodities</i>	Algoritmos de alocação de carregamento com viés aleatório
Brown, Graves e Ronen (1987)	Transporte de petróleo para exportação para Europa e EUA a partir de países do Oriente Médio	Modelo baseado em <i>set partitioning</i>
Perakis e Bremer (1992)	Programação de navios na empresa Chevron	Formulação matemática baseada em Appelgren (1971) e construção de um “gerador de <i>schedule</i> ” para construir programas factíveis
Haugen (1996)	Distribuição de gás natural na Europa	Programação dinâmica estocástica aplicada a programação de projetos (<i>Stochastic Project Scheduling Problem</i>)
Sherali, Al-Yakoob e Hassan (1999)	Programação de navios exportadores de petróleo e gás natural no Kuwait	Baseado em Brown, Graves e Ronen (1987), apresenta método exato e heurística para horizonte de tempo rolante
Christiansen (1999)	Problema de coleta e entrega integrado de escoamento de amônia em uma empresa norueguesa	Modelo inteiro misto com método de geração de colunas
Lasschuit e Thijseen (2004)	Planejamento estratégico de cadeia de suprimentos global da indústria química e de petróleo	Programação não-linear inteira mista baseado em GMOS/NetSim
Persson e Göthe-Lundgren (2005)	Programação de navios para escoamento de betume	Modelo inteiro misto com desigualdades válidas e geração de colunas
Al-Khayyal e Hwang (2007)	Transporte marítimo de diversos líquidos a granel	Programação inteira mista linear e não-linear
Gribkovskaia, Laporte e Shlopak (2008)	Provisionamento de plataformas de petróleo e gás do Mar da Noruega	Heurísticas construtivas e algoritmo baseado em busca tabu
Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009)	Alocação de petróleo para o processo logístico da Petrobras	Programação inteira mista e heurística baseada em busca local
Brønmo, Nygreen e Lysgaard (2010)	Programação de coletas e entregas de navios com flexibilidade de carga	Programação inteira com decomposição Dantzig-Wolfe
Kobayashi e Kubo (2010)	Programação operacional de uma frota de cabotagem para petróleo no Japão	Programação inteira e heurística própria desenvolvida pelos autores
Andersson et al. (2010)	Revisão bibliográfica de modelos do tipo <i>inventory routing problem</i> integrados com gestão de estoque, com ênfase em aspectos práticos de aplicações industriais para modais marítimos e terrestres	
Hoff et al. (2010)	Continuação do trabalho de Andersson et al. (2010), com foco em estudos que integram problemas de roteirização com composição de frota	
Hennig et al. (2012)	Problema de coleta e entrega de petróleo com fracionamento de carga	Programação inteira mista com rotas pré-geradas
Stålhane et al. (2012)	Problema de coleta e entrega com fracionamento de carga	Método <i>branch-and-price-and-cut</i>
Song e Furman (2013)	Modelos do tipo IRP	Proposta de <i>framework</i> flexível para guiar as aplicações de modelos baseados em IRP com formulação de <i>multi-commodity flow</i>

Christiansen et al. (2013)	Recente levantamento bibliográfico de problemas de roteirização e programação de navios e problemas correlatos que ilustram os principais domínios da área.
-------------------------------	---

Em posse do ferramental teórico e principais referências bibliográficas acerca do tema, é possível descrever o problema tratado neste trabalho, bem como sua modelagem matemática e procedimentos de solução. O próximo capítulo deste trabalho inicia-se com uma breve caracterização da empresa-alvo do estudo de caso e os principais aspectos do sistema produtivo relacionado. Por fim, apresenta-se a modelagem matemática completa do problema.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo, são abordadas as principais características do problema da empresa que compõe a unidade de análise do estudo de caso deste trabalho, e a sua correspondente modelagem matemática. Inicialmente, é fornecida uma visão geral de suas principais atividades e uma consolidação do perfil corporativo, com o objetivo de demonstrar sua importância e impacto. Posteriormente, o modelo matemático é detalhadamente descrito, com ênfase nas restrições e considerações adicionais aplicadas ao problema em mãos.

3.1 Caracterização da empresa do estudo de caso

Segundo PFC Energy (2013), a Petrobras é atualmente a sétima maior empresa de energia do mundo, de acordo com listagem publicada em Janeiro de 2013 pela empresa executora do estudo, que é uma consultoria especializada no mercado global de óleo e gás. O quadro 3.1 exibe as 10 maiores empresas do setor mundial, em valor de mercado.

Quadro 3.1 – Listagem das 10 maiores empresas de energia do mundo, em valor de mercado.

Colocação	Empresa	País	Valor de Mercado (em bilhões de US\$)
1	ExxonMobil	Estados Unidos	394,6
2	PetroChina	China	264,5
3	Royal Dutch Shell	Holanda	222,6
4	Chevron	Estados Unidos	211,6
5	BP	Reino Unido	132,1
6	Ecopetrol	Colombia	126,6
7	Petrobras	Brasil	124,7
8	TOTAL	França	121,9
9	Gazprom	Rússia	112,3
10	CNOOC	China	96,7

Fonte: PFC Energy, 2013.

De acordo com Petrobras (2014a), a empresa atua nos seguintes setores: exploração e produção, refino, comercialização e transporte de óleo e gás natural, petroquímica, distribuição de derivados, energia elétrica, biocombustíveis e outras fontes

renováveis de energia. Uma forma mais didática e intuitiva de apresentar e relacionar os principais números que traduzem o perfil da companhia é em sua forma consolidada no formato de quadro. Assim, com base nos dados apresentados em PETROBRAS (2014a), os principais indicadores podem ser resumidos no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Principais indicadores da Petrobras

Indicadores Financeiros e Gerais	
Investimentos	R\$73 bilhões
Receita Líquida	R\$244 bilhões
Lucro Líquido	R\$33 bilhões
Acionistas	673.932
Presença Global	28 países
Número de empregados	81.918
Produção de Petróleo e Derivados	
Produção Diária	2.621.000 barris de petróleo 452.000 barris de gás natural
Reservas	16,4 bilhões de barris
Plataformas	125 (77 fixas; 48 flutuantes)
Refinarias	
Número de refinarias	15
Rendimento médio das refinarias	2.044.000 barris de derivados por dia
Logística e Distribuição da Produção	
Número de navios	242 (56 de propriedade da Petrobras)
Extensão dos Dutos	30.067 km
Energias Alternativas	
Usinas de Biocombustíveis	7 usinas (5 de produção; 2 experimentais)
Termelétricas	16 usinas
Energia Eólica	4 usinas
Distribuição de Produto Final e Outros	
Números Postos de Combustível	8.356
Fertilizantes	2 fábricas

Fonte: PETROBRAS (2014b).

3.2 Descrição do sistema de escoamento de petróleo *offshore*

O petróleo é produzido pela Petrobras a partir de campos próprios de produção, dos quais 95% são constituídos por plataformas *offshore*. Após ser explorado nas plataformas, o petróleo segue para os terminais por meio de dutos ou navios petroleiros. No Brasil, somente três terminais possuem comunicação com as plataformas por meio de dutos e, portanto, a grande parte do transporte de petróleo se dá por meio de navios. Em seguida, o petróleo pode seguir diretamente para exportação ou, então, ser encaminhado por meio de dutos para as refinarias da companhia para ser processado industrialmente. A figura 3.1 ilustra de forma resumida a cadeia de suprimentos descrita (ROCHA, GROSSMANN E POGGI DE ARAGÃO, 2009).

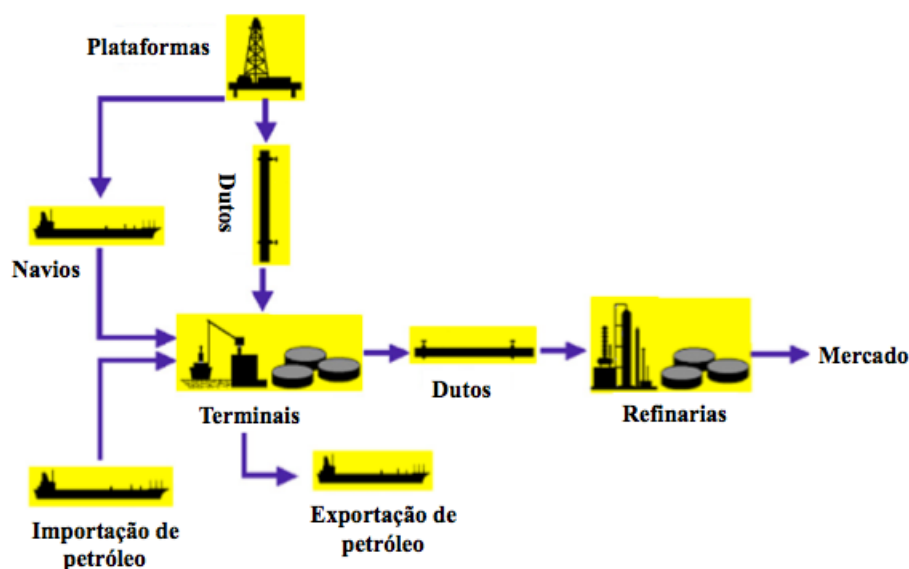


Figura 3.1 – Ilustração da cadeia de suprimentos do petróleo da Petrobras.
Fonte: Adaptado de Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009).

A estrutura hierárquica de decisões para a cadeia de suprimentos da Petrobras ocorre em três níveis: agregado, intermediário e operacional. Em um nível mais agregado de planejamento, a empresa utiliza um *software* baseado em programação linear, denominado PLANAB, que é responsável por determinar a quantidade e tipo de petróleo que será processado em cada refinaria mensalmente, bem como as definições de importação e exportação para um horizonte de 3 meses. Em um nível intermediário, a empresa procede com a alocação de petróleo, que consiste em refinar e desdobrar a informação do nível agregado para uma periodicidade diária, considerando restrições detalhadas da cadeia de suprimentos

do petróleo. Por fim, no nível operacional, ocorrem as decisões de roteirização e programação de refinarias, navios e dutos. A figura 3.2 ilustra a divisão da estrutura de planejamento da Petrobras.



Figura 3.2 – Estrutura hierárquica do planejamento da cadeia de suprimentos do petróleo.

Fonte: Adaptado de Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009).

Um dos problemas enfrentados pela Petrobras em sua operação de escoamento de petróleo *offshore* consiste em endereçar um conjunto de solicitações de movimentação com origens e destinos pré-estabelecidos pelo planejamento tático da organização, cujos atributos definem o traslado de uma dada carga dentro de janelas de tempo para coletas em plataformas e entregas em terminais. A partir desta contextualização, é possível classificar o problema como sendo uma clássica representação de programação e roteirização do tipo coleta e entrega com janelas de tempo, além de restrições adicionais que contemplam especificidades do caso em estudo. Portanto, foi escolhida como ponto de partida para a modelagem deste problema a formulação clássica de um PDPTW (*pick-up and delivery problem with time windows*), conforme apresentado no capítulo anterior.

A seguir, cada um dos mais relevantes aspectos do problema é tratado em tópicos específicos, de forma a conferir maior detalhamento sobre o conjunto de circunstâncias e restrições que compõem esta abordagem do problema.

3.2.1 Produto

O produto considerado neste trabalho consiste unicamente em petróleo cru, que se subdivide em mais de 50 diferentes tipos de subprodutos. Segundo Petrobras (2014c), cada uma das plataformas produz um petróleo característico, que é diferente dos demais por se tratar de um produto natural, cuja posição geográfica do campo de exploração influencia diretamente em sua composição e estrutura química. De acordo com Rocha, Grossmann e Poggi de Aragão (2009), os petróleos podem ser divididos em 6 categorias: lubrificantes, leves, resíduos atmosféricos craqueados, baixo enxofre ou LSC (*low sulfur content*), Marlim⁵ e asfáltico.

Existe a possibilidade de que alguns desses tipos de petróleo sejam transportados juntos, em forma de uma mistura, dependendo das requisições vindas da refinaria. No entanto, este não é o último nível de decisão e o capitão do navio toma a decisão final sobre a alocação dos petróleos nos diferentes compartimentos. Dessa forma, é possível tratar o problema como monoproduto (*single commodity*), uma vez que cada petróleo ofertado por uma plataforma para cada terminal é único. Destaca-se que o transporte de derivados de petróleo está fora do escopo deste trabalho.

3.2.2 Frota

A frota de navios é heterogênea, apresentando custos de operação, velocidades médias e capacidades diferentes. Há aproximadamente 120 navios que são utilizados para o transporte exclusivo de petróleo, sendo que cerca de 50 deles são próprios. A frota de navios é dedicada de acordo com o tipo de produto que o navio transporta e os portos e plataformas que ele atende. Os navios que são tratados neste trabalho transportam somente petróleo (navios petroleiros) e apresentam compartimentos para alocação dos produtos. É possível transportar mais de um tipo de petróleo em um mesmo compartimento do navio, desde que estes produtos tenham compatibilidade entre si, permitindo misturá-los. Esta condição é tratada em uma restrição adicional específica do modelo. No entanto, em situações práticas, o comandante que opera o navio é capaz de tomar decisões de alocação de petróleos aos compartimentos, de tal forma que a mistura não seja necessária. Isto é possível principalmente porque o número de coletas sucessivas é reduzido e existem restrições que limitam a carga

⁵ Refere-se a uma categoria de petróleo que é produzida exclusivamente no campo de produção Marlim.

máxima permitida a bordo do navio para uma atracação segura, fazendo com que os compartimentos disponíveis nos navios sejam suficientes para acomodar os produtos coletados.

Uma forma de classificar os navios é de acordo com sua capacidade de transportar carga. O quadro 3.3 apresenta as classes de navios e suas respectivas capacidades de transporte de petróleo.

Quadro 3.3 – Capacidade dos navios de acordo com sua classe.

Classe	Capacidade (m ³)
Handy - C	19.000
Handy - R	30.000
Handy - L	40.000
Pamamax	65.000
Aframax	100.000
Suezmax	140.000
New-Suezmax	160.000
VLCC	350.000

Fonte: Rocha, Grossmann, Poggi de Aragão (2009).

Duas características dos navios que definem a sua possibilidade de atracação em portos e plataformas são o calado e o comprimento ou LOA (*length overall*). O calado é definido como a distância vertical, tirado sobre um plano transversal, entre a parte extrema inferior da embarcação e a linha determinada pela intersecção da superfície da água com a superfície externa do casco. Já o LOA, também conhecido como “comprimento de roda a roda”, refere-se à distância entre os pontos mais salientes da parte frontal e traseira da embarcação, ou seja, o seu comprimento total (SOBENA, 2013). O LOA e o calado do navio podem impor restrições na sua atracação em uma plataforma ou terminal. A figura 3.3 ilustra estes dois conceitos apresentados.

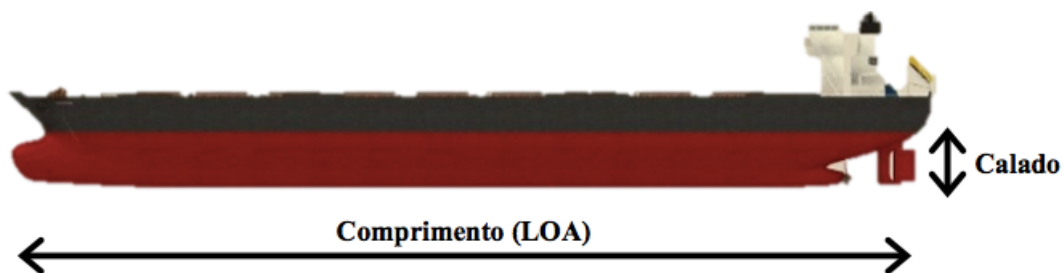


Figura 3.3 – Ilustração de um navio petroleiro com as respectivas marcações de LOA e calado.

Fonte: Adaptado de SOBENA(2013).

Alguns navios da frota apresentam, ainda, um sistema denominado posicionamento dinâmico ou DP (*dynamic positioning*) que, segundo UFRJ (2013), controla automaticamente a posição de uma embarcação através de uma propulsão ativa, que apresenta resposta compatível às mudanças no empuxo requerido, de acordo com a variação das condições ambientais, tais como ondas, ventos e chuvas. Este sistema depende de avançados mecanismos de controle e de um treinamento especial por parte dos operadores para lidar com as respostas geradas. A falta de equipamento de posicionamento dinâmico pode, ainda, limitar a atracção de um navio em cada plataforma e em cada terminal.

A posição da frota é identificada através de coordenadas para a latitude e longitude de cada navio, sendo necessário o cálculo de distâncias aos pontos operacionais e estimativas dos tempos de viagens em função das velocidades médias informadas para cada navio, dentro de um sistema de informação próprio da empresa. Para fins de ilustração, a figura 3.4 exhibe dois navios da Petrobras atracados no terminal de São Sebastião, no litoral norte do Estado de São Paulo.



Figura 3.4 – Navios Recife Knutsen (esquerda) e Stena Spirit (direita) atracados no terminal de São Sebastião, no litoral norte de São Paulo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Plataformas

Existem 50 plataformas em operação que produzem diferentes tipos de petróleo. O estoque delas não pode ultrapassar um determinado limite máximo, fixado de acordo com a operação e capacidade de cada uma delas, pois incorre em uma parada de produção e custos proibitivos. Essa situação é conhecida tecnicamente como “*top*” da plataforma e é, portanto, uma preocupação primordial dos tomadores de decisão. Quando um navio atraca em uma plataforma para realizar a coleta de petróleo, esta operação é denominada de *alívio da plataforma*.

As janelas de tempo dos terminais podem ser flexíveis (*soft*) em alguns casos, podendo ser desrespeitadas com a aplicação de alguma penalidade. As janelas de tempo das plataformas também podem ter seu limitante inferior flexível em alguns casos, mas seu limitante superior, em geral, é rígido (*hard*). Para fins de simplificação, todas as janelas de tempo e seus limitantes são tratados nesta modelagem como sendo rígidos, sem a aplicação de penalidades.

De acordo com Petrobras (2014c), existem 5 tipos de plataformas utilizadas pela companhia. A primeira delas é a plataforma fixa, que é geralmente utilizada em campos

que possuam exploração com até 300m de profundidade. Elas são constituídas de estruturas modulares de aço e instaladas com estacas cravadas no fundo do mar. Estas plataformas são projetadas para receber todos os equipamentos de perfuração, estocagem de materiais, alojamento de pessoal e as instalações inerentes à produção dos poços. Uma plataforma fixa encontra-se representada na figura 3.5.



Figura 3.5 – Plataforma fixa Garoupa 1 na bacia de Campos.

Fonte: Petrobras (2014b).

O segundo tipo de plataforma é a denominada FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que se constitui de navios com capacidade de processar e armazenar petróleo e promover a transferência destes produtos. No convés do navio, instala-se uma planta de processo que trata e separa os fluidos explorados e, posteriormente, o petróleo é armazenado nos próprios tanques do navio. Eles podem ou não apresentar posicionamento dinâmico. Um exemplo de plataforma FPSO é apresentado na figura 3.6.



Figura 3.6 – Navio de produção P-32 em operação no campo de Marlim.

Fonte: Petrobras (2014b).

Um terceiro tipo de plataforma utilizado pela companhia consiste em navios-sonda que são projetados para perfurar e explorar poços em alto mar. A torre de perfuração do navio localiza-se em seu centro e possui uma abertura no casco que permite a passagem da coluna responsável pela perfuração do solo marítimo. Algumas plataformas são equipadas com sistemas de posicionamento dinâmico para evitar deslocamentos de posição que coloquem a operação em risco. A figura 3.7 ilustra um navio-sonda.



Figura 3.7 – Navio-sonda NS-16 operando no campo de Congo.

Fonte: Petrobras (2014b).

O quarto tipo de plataforma é a plataforma semissubmersível, que são compostas por uma estrutura de um ou mais conveses, que são apoiados por colunas em flutuadores submersos. Elas podem apresentar posicionamento dinâmico ou não e são usadas na exploração/perfuração ou na produção (tipos com características diferentes). Este é um tipo de plataforma que, além do posicionamento dinâmico, livra-se da ação das ondas, correntes e ventos por meio de um sistema de ancoragem. Além disso, elas podem possuir sistema de propulsão própria, apresentando grande mobilidade. A figura 3.8 reproduz um exemplo de plataforma semissubmersível.



Figura 3.8 – Plataforma P-40 operando no campo de Marlim Sul.

Fonte: Petrobras (2014b).

O quinto e último tipo de plataforma é a plataforma autoelevável ou autoelevatória, composta por uma balsa equipada com estrutura de apoio que, ao ser acionada mecânica ou hidraulicamente, movimenta-se para baixo até atingir o solo marítimo. Posteriormente, as estruturas elevam a plataforma a um nível seguro que esteja fora da ação das ondas. Estas plataformas são também móveis e transportadas por rebocadores ou propulsão própria e comumente utilizadas em explorações que tenham uma lâmina d'água que varia de 5 a 130m. A figura 3.9 apresenta um exemplo de plataforma autoelevável.



Figura 3.9 – Plataforma PA-6 operando no campo de Garoupa.

Fonte: Petrobras (2014b).

3.2.4 Terminais

Existem 10 terminais que recebem petróleo, pertencentes à companhia ao longo da costa brasileira, com aproximadamente 20 berços no total. Os berços são locais específicos nos terminais marítimos nos quais os navios atracam para poder realizar o

embarque e desembarque de cargas. A figura 3.10 ilustra dois navios ocupando berços diferentes em um terminal. Cada um dos berços apresenta restrições físicas de calado e LOA para que os navios possam atracar. Cada navio ocupa um único berço, de tal forma que os navios maiores devem ocupar berços que o comportem e, em contrapartida, os navios menores podem atracar em berços de qualquer tamanho, mesmo que este acomode navios maiores que ele.



Figura 3.10 – Detalhe de dois navios ocupando dois berços em um terminal portuário de Paranaguá-PR.

Fonte: Revista do Aço (2013).

A figura 3.11 fornece uma visão mais abrangente de um terminal localizado no estado do Rio de Janeiro, que representa a ligação entre as operações de berços na costa e as atividades dos tanques e refinarias em solo.



Figura 3.11 – Terminal localizado no estado do Rio de Janeiro.

Fonte: Revista Fundações e Obras Geotécnicas (2013).

Dentro do contexto da operação tratada por este trabalho, tanto os terminais quanto as plataformas são comumente referidos como *pontos operacionais*. Assim, um ponto operacional pode ser constituído de uma plataforma ou um terminal – no segundo caso, este ainda pode apresentar um ou mais berços. Esta denominação será mantida no decorrer da apresentação do modelo matemático deste trabalho.

3.2.5 Demanda

Os pares de coleta e entrega são pré-estabelecidos pelo planejamento tático em nível de requisitos da refinaria, porém a alocação dos navios não está determinada e se configura como uma das principais decisões fornecidas pelo modelo a ser apresentado. Um navio não pode atender qualquer plataforma, pois existem navios específicos para algumas delas, devido às restrições físicas de atracação – o que vale também para os terminais, conforme discutido anteriormente. Para fins de utilização de termos fiéis aos usados pela operação real dos navios, é utilizado o termo *escala* para referir-se a cada um dos trechos de viagem realizado por cada navio entre dois pontos quaisquer. Portanto, uma rota completa de um navio é composta por um número finito de escalas.

O modelo que compõe este trabalho pode ser referenciado como um modelo *origem-destino*, uma vez que cada uma das origens (plataformas) é pré-definida com seu respectivo destino (terminal). Em contrapartida, um modelo de paradigma mais geral poderia

ser definido como *oferta-demanda*, no qual uma coleção de nós (plataformas) oferta produtos e outra coleção de nós (terminais) os demanda, de tal forma que o modelo também tomaria decisões de volume de carga a ser alocada em cada visita do navio, neste caso permitindo a separação (*split*) da carga em diversos navios. Ressalta-se que no contexto deste trabalho a separação de cargas não foi considerada, seguindo práticas da empresa.

Observa-se que o modelo a seguir não trata os estoques dos terminais e plataformas de forma explícita. Assim, eles estão considerados implicitamente na definição das janelas de tempo, que são construídas com base nas requisições das refinarias e, posteriormente, traduzidas em solicitações dos terminais e necessidade de alívio nas plataformas.

3.2.6 Principais dados de entrada

Todos os dados de entrada são gerados por sistemas específicos dentro da empresa, os quais este trabalho não cobriu ou teve acesso. O intuito de exibir uma listagem dividida por categorias é facilitar o entendimento posterior da modelagem matemática e os principais dados que são manipulados pelo modelo.

Lista de Coletas e Entregas

- Carga a ser coletada na plataforma;
- Carga a ser entregue no terminal;
- Janela de tempo de coleta;
- Janela de tempo de entrega;
- Custo fixo de descarga no terminal;
- Custo fixo de carregamento na plataforma;

Lista de Navios

- Capacidade do navio;
- Outras características do navio (LOA, calado e velocidade média);
- Consumo do combustível do navio durante operação nas plataformas e/ou terminais;
- Consumo de combustível do navio durante deslocamento;

Os custos referentes ao consumo de combustível do navio são geralmente regidos e definidos por contratos de afretamento que preveem valores diferentes para os

consumos do navio em movimento e parado (*stand-by*), de acordo com sua categoria e utilização. Estes contratos são recorrentemente negociados pois representam uma importante parcela do custo operacional dos navios nas atividades de coleta e entrega de petróleo. Estes custos serão incorporados no modelo por meio de termos específicos para diferentes versões da função objetivo, que serão apresentadas na seção 3.3.5.

Estado Atual dos Navios

- Posicionamento do navio (latitude e longitude atuais) ou ponto operacional mais próximo;

Viagens já efetuadas

- Escalas previstas;
- Estoque previsto para o navio em cada escala;
- Tempo previsto para cada escala de acordo com os dados históricos de cada operação realizada por navio;

Lista de Pontos Operacionais

- Localização dos pontos operacionais (plataformas e terminais);
- Características do ponto operacional (LOA, calado e taxa de bombeamento);
- Distância entre os pontos operacionais (matriz com distância entre cada ponto);
- Custo de viagem entre os pontos operacionais.

Em posse da caracterização geral do sistema de escoamento de petróleo *offshore* e o entendimento dos principais dados de entrada, torna-se possível a apresentação do modelo matemático utilizado para abordar o problema proposto por esta pesquisa.

3.3 Modelagem Matemática

O modelo construído neste trabalho é baseado na formulação PDPTW apresentada na seção 2.3.4 deste trabalho. Como é possível se ter vários pares origem-destino programados envolvendo a mesma plataforma ou terminal, em cada visita o navio coleta toda quantidade ofertada na plataforma e entrega toda essa quantidade no terminal correspondente. Assim, utiliza-se a estratégia de replicação dos nós para cada pedido de coleta ou cada pedido de entrega em determinado ponto operacional. Portanto, cada pedido associado a um

determinado ponto operacional resulta na criação de um nó diferente para compor o grafo. Destaca-se que dois nós do grafo podem representar o mesmo ponto operacional, porém se diferenciam com relação ao lote de coleta ou entrega que está sendo operado.

O modelo é capaz de capturar adequadamente uma série de características importantes do problema. Entre elas, encontram-se: heterogeneidade da frota de navios, regras de atracação de navios para diferentes tipos de plataformas e terminais, consumo de combustível dos navios em função dos contratos de afretamento e incompatibilidade de mistura de produtos transportados em um navio.

Porém, existem também algumas hipóteses simplificadoras que foram consideradas para a confecção do modelo. Admite-se que todas as janelas de tempo das plataformas e terminais são rígidas e, portanto, não se aplicam penalidades para possíveis violações nos seus limitantes inferiores ou superiores de tempo. Além disso, um aspecto relevante do problema é a consideração de estoques nas plataformas e nos terminais, que é tratado implicitamente neste modelo por meio das janelas de tempo. Admite-se que elas são definidas a partir de um planejamento anterior de nível mais agregado, em que as variações e limitações de estoque são consideradas, como é o caso da Petrobras. Por exemplo, supõe-se que os chamados “*top*” das plataformas estão contemplados nestas janelas de tempo. Como consequência da abordagem origem-destino, não se permite a separação de cargas (*split*) na coleta ou entrega dos navios, fato que alteraria o paradigma do problema para um mais geral de *oferta-demanda*, em que a quantidade a ser coletada e entregue em cada plataforma e em cada terminal seria uma decisão do modelo, e não um parâmetro.

A figura 3.12 apresenta uma representação esquemática, na qual os nós assinalados em vermelho representam os depósitos artificiais (localização inicial e final) do navio, enquanto que os nós azuis referem-se a visitas realizadas em pontos operacionais.



Figura 3.12 - Representação esquemática da estratégia de replicação de nós e depósitos artificiais adotada na modelagem do problema.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta figura, é possível verificar a estratégia de duplicação de nós para as visitas do roteiro. Neste caso, o navio parte do depósito artificial de origem (nó 1), realiza uma coleta na plataforma 2 e a respectiva entrega no terminal 3. Posteriormente, o navio visita novamente a mesma plataforma, agora assinalada como nó 4, para entregar o produto no terminal 5 e encerrar sua rota no depósito artificial definido como nó 6. Repare que os nós 2 e 4 referem-se ao mesmo ponto operacional, porém designam coletas diferentes dentro do horizonte de planejamento. Destaca-se também que as ilustrações dos depósitos fictícios inicial e final apresentam um posicionamento arbitrário apenas para fins de representação esquemática. Na prática, os navios geralmente iniciam e encerram suas jornadas de trabalho próximos aos terminais ou plataformas, em áreas conhecidas como “zonas de fundeio”, a qual acolhem navios ociosos ou aguardando carga. No entanto, desta forma, a modelagem considera situações em que no início do horizonte de planejamento, alguns navios possam estar fora das zonas de fundeio. Convém salientar, ainda, que os navios percorrem caminhos

ao longo do horizonte de planejamento, ao invés de roteiros, uma vez que estes não precisam iniciar e terminar no mesmo ponto (depósito).

Índices

- k é o índice que se refere aos navios ($k \in K$). O número total de navios é $|K|$;
- i, j são os índices que se referem aos pontos operacionais (plataformas ou terminais) e depósitos. Assim, os termos (i, j, k) constituem as escalas realizadas pelo navio k ;

Conjuntos

- n é o número de pares coleta/entrega;
- $C_1 = \{1, 2, \dots, n\}$ é o conjunto de nós onde são realizadas as coletas (origens) ;
- $C_2 = \{n+1, n+2, \dots, 2n\}$ é o conjunto de nós onde são realizadas as entregas (destinos). Os nós de C_2 são enumerados da seguinte forma: para cada $i \in C_1$ é criado o nó $(i+n)$ no qual o nó $i \in C_1$ refere-se à origem e o nó $(i+n) \in C_2$ refere-se ao respectivo destino $(i+n)$. Note que $n = |C_1| = |C_2|$;
- $C = C_1 \cup C_2$ é o conjunto total de nós que representam as plataformas e terminais, onde a cardinalidade do conjunto é dada por $|C| = 2n$;
- $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|K|}\}$ é o conjunto de nós artificiais que indicam o depósito inicial s_k (*start node*) do navio k ;
- $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{|K|}\}$ é o conjunto de nós artificiais que indicam o depósito de chegada e_k (*end node*) do navio k ;
- O conjunto $N = C \cup S \cup E$ representa todos os nós, onde $|N| = 2n + 2|K|$;
- $A(i, k), \forall i \in C, \forall k \in K$ é uma matriz 0-1 que indica se o navio k não pode atracar no nó i (igual a 1), seja por conta de calado, LOA ou outros motivos, ou se pode atracar (igual a 0);

Parâmetros

- v_k é a velocidade média, em nós, do navio k ;
- $dist_{ij}$ é a distância, em milhas náuticas, entre nó $i \in (S \cup C)$ e o nó $j \in (C \cup E)$. Para representar as coletas ou entregas consecutivas que são realizadas no mesmo ponto operacional (plataforma ou terminal), utiliza-se o artifício de modelagem de definir $dist_{ij} = 0$, uma vez que não há deslocamento do navio ao realizar estas operações consecutivas no mesmo ponto operacional;

- ts_{ik} representa o tempo de serviço, em horas, no nó $i \in C$ atendido pelo navio k ;
- $[a_i, b_i]$ é a janela de tempo, em horas, referente ao início de serviço no nó $i \in N$, no qual a_i representa seu limitante inferior e b_i o limitante superior;
- d_i é a quantidade de carga, em m^3 , a ser coletada ou entregue no nó $i \in C$, que pode assumir valores positivos ou negativos. Se esta demanda for positiva, indica que no ponto operacional i devem ser coletadas d_i unidades do produto. Se for negativa, indica que no ponto operacional i devem ser entregues d_i unidades do produto. Note que, por convenção, $d_{i+n} = -d_i$;
- Cap_k é a capacidade do navio k , em m^3 ;
- M é um número suficientemente grande utilizado para linearizar algumas restrições;

Variáveis

- x_{ijk} é uma variável binária, que assume valor igual a 1 se navio k percorre o arco $(i, j), i \in (S \cup C), j \in (C \cup E)$ e 0, caso contrário;
- f_{ik} é uma variável inteira não-negativa que indica o instante de início de serviço no nó $i \in N$ pelo navio k ;
- y_{ik} é a quantidade de carga no navio k no instante imediatamente após a escala no nó $i \in N$. Neste modelo, assume-se que o navio começa e termina vazio dentro do horizonte de planejamento;

Modelo

Minimizar

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} dist_{ij} x_{ijk} \quad (3.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in (C \cup E)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in (C \cup S) \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in (C \cup S)} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in (C \cup E) \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in (C_1 \cup e_k)} x_{s_k j k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in (s_k \cup C_2)} x_{i e_k k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in S \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in E \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in (C \cup S)} x_{ihk} - \sum_{j \in (C \cup E)} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in C; \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$a_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \leq f_{ik} \leq b_i \left(\sum_{j \in N} x_{jik} \right) \quad \forall i \in (C \cup E); \forall k \in K \quad (3.9)$$

$$a_i \left(\sum_{j \in N} x_{ijk} \right) \leq f_{ik} \leq b_i \left(\sum_{j \in N} x_{ijk} \right) \quad \forall i \in S; \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} f_{jk} &\geq f_{ik} + ts_{ik} + \frac{\text{dist}_{ij}}{v_k} + (x_{ijk} - 1)M && \forall i \in (S \cup C) \\ & && \forall j \in (E \cup C) \\ & && \forall k \in K \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$f_{j+n,k} \geq f_{j,k} \quad \forall j \in C; \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} y_{jk} &\geq y_{ik} + d_j + (x_{ijk} - 1)M && \forall k \in K \\ & && \forall i \in (S \cup C) \\ & && \forall j \in (E \cup C) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} y_{jk} &\leq y_{ik} + d_j + (1 - x_{ijk})M && \forall k \in K \\ & && \forall i \in (S \cup C) \\ & && \forall j \in (E \cup C) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\sum_{i \in (S \cup C)} x_{ihk} = \sum_{j \in C} x_{j,h+n,k} \quad \forall h \in C_1; \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$y_{jk} \leq Cap_k \sum_{i \in (S \cup C)} x_{ijk} \quad \forall k \in K, \forall j \in (C \cup E) \quad (3.16)$$

$$\sum_{k \in K} y_{s_k k} + \sum_{k \in K} y_{e_k k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (3.17)$$

$$x_{ijk} = 0, \forall i, k \in A(i, k) \quad (3.18)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in (S \cup C), j \in (C \cup E); \forall k \in K \quad (3.19)$$

$$f_{ik} \geq 0, \forall i \in N; \forall k \in K \quad (3.20)$$

$$y_{ik} \geq 0, \forall i \in N; \forall k \in K \quad (3.21)$$

A função objetivo (FO) deste modelo, dada por (3.1), é baseada nos modelos clássicos da literatura e minimiza a distância total percorrida.

As restrições (3.2) e (3.3) asseguram que todos os pontos operacionais sejam visitados exatamente uma vez. As restrições (3.2) garantem que existe exatamente um arco no roteiro que sai de i e as restrições (3.3), por sua vez, asseguram que existe exatamente um arco no roteiro que entra em j .

As restrições (3.4) asseguram que todos os navios saem do seu depósito artificial de origem, s_k . Se um navio não realiza nenhuma escala, ele sai do depósito e vai diretamente para seu depósito artificial final, e_k . As restrições (3.5) garantem, por sua vez, que todos os navios chegam ao seu depósito artificial final, e_k .

As restrições (3.6) garantem que nenhum navio entra no depósito artificial inicial e as restrições (3.7) certificam que nenhum navio sai do seu respectivo depósito artificial final.

As restrições (3.8) asseguram que se um navio k chegou a um nó referente a um ponto operacional, este navio tem que sair deste nó – restrição comumente empregada em roteirização e também conhecida como restrição de conservação de fluxo. Esta restrição não impede a formação de ciclos dentro dos roteiros estabelecidos pelos modelos. Os ciclos são eliminados por meio das restrições (3.11) definidas a seguir, que garantem que os tempos de visita dos navios em cada nó do roteiro sejam não-decrescentes.

As restrições (3.9) asseguram que os limitantes superiores e inferiores das janelas de tempo dos pontos operacionais e depósitos artificiais finais sejam respeitados. Analogamente, as restrições (3.10) asseguram que os limitantes superiores e inferiores das janelas de tempo dos depósitos artificiais de origem sejam respeitados.

As restrições (3.11) limitam o instante de tempo em que o navio k , vindo do ponto operacional i , inicia serviço no ponto operacional j . Em outras palavras, o instante de início de serviço no nó i , somado ao tempo de deslocamento entre os nós i e j e ao tempo de serviço do nó i deve ser menor ou igual ao instante de início de serviço do nó j . Caso este instante de tempo seja menor que o instante de tempo de início do serviço no nó j , o navio passa por um tempo de espera, em que ele fica parado aguardando início do serviço. Este tempo de espera, em alguns casos, pode ser ocasionado por ocorrência de filas. É esta restrição que elimina a ocorrência de subciclos ou *sub-tours* no modelo. Esta restrição é uma

linearização da relação $x_{ijk} \left(f_{ik} + \frac{dist_{ij}}{v_k} + ts_{ik} - f_{jk} \right) \leq 0$, $\forall i \in (S \cup C), \forall j \in (E \cup C), \forall k \in K$,

que apresenta não-linearidade ao multiplicar duas variáveis (x_{ijk} e f_{ik}). A figura 3.13 oferece uma representação esquemática para auxiliar no entendimento das restrições descritas.

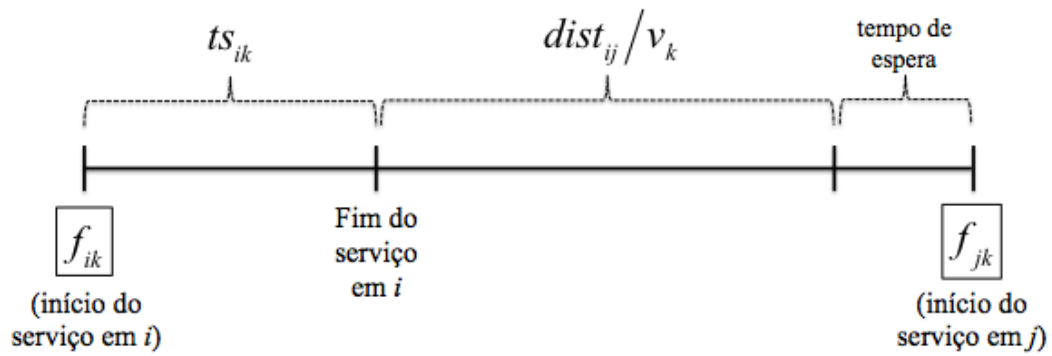


Figura 3.13 – Representação esquemática da relação entre os instantes de início de serviço nos nós i e j , os tempos de serviço no nó e os tempos de deslocamento.

As restrições (3.12) reforçam a necessidade da coleta de uma determinada carga ser realizada antes de sua respectiva entrega. É uma restrição redundante capaz de produzir um corte adicional, auxiliando na geração de um melhor limitante inferior.

As restrições (3.13) e (3.14) referem-se ao balanço de carga do navio k , representado esquematicamente na figura 3.14 para os casos em que a quantidade de carga é positiva ou negativa. Note que estas restrições referem-se a linearização da igualdade $x_{ijk}(y_{ik} + d_j - y_{jk}) = 0$, $\forall i \in (S \cup C), \forall j \in (C \cup E), \forall k \in K$, que também apresenta não-linearidade ao multiplicar variáveis (x_{ijk} , y_{ik} e y_{jk}). Estas restrições, diferentemente das representadas por (3.11), não evitam subciclos na solução do problema, porque a carga no navio pode crescer e decrescer ao longo do caminho do navio.

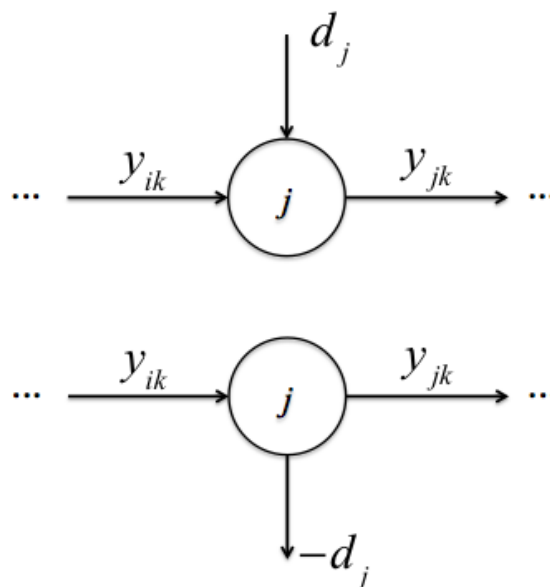


Figura 3.14 – Representação das restrições de balanço de carga para o navio k .

As restrições (3.15) asseguram que se o navio k coletou carga no nó h (plataforma), então ele precisa realizar a escala (entregar esta carga) no nó $h+n$ (terminal).

As restrições (3.16) asseguram que a capacidade do navio é respeitada. A observação anterior de que o navio começa e termina vazio é garantida pelas restrições (3.17).

As restrições (3.18) impedem que navios atraquem em nós nos quais exista algum impedimento físico, seja de calado, LOA ou outros. Esta restrição é garantida com a construção da matriz $A(i,k)$, pois reproduz com certo realismo os procedimentos de decisão do operador, que define com base em sua experiência as relações (i,k) que não podem existir na prática. Por fim, as restrições de (3.19) a (3.21) referem-se aos domínios das variáveis do modelo.

3.3.1 Restrições adicionais para representar posicionamento dinâmico e limitação de carga a bordo do navio

Estas restrições capturam importantes características do problema descrito, no que se refere à heterogeneidade da frota em termos de tecnologia de atracação (posicionamento dinâmico) e dos pontos operacionais aos quais os navios devem atracar, cujos atributos variam de acordo com as condições regionais. Esta configuração altamente heterogênea faz com que o modelo em mãos represente uma importante situação real de maneira estruturada.

Alguns terminais apresentam grandes restrições de calado, devido ao seu posicionamento geográfico e efeitos resultantes de correntes de água e salinidade. Para estes terminais que possuem alta limitação de calado, a carga que o navio carrega ao atracar torna-se crítica para possibilitar esta manobra. No entanto, é possível flexibilizar alguns dos impedimentos representados pela matriz de incompatibilidade de atracação $A(i,k)$ aplicando uma tolerância à capacidade máxima do navio. Em outras palavras, é possível permitir que alguns navios que originalmente não poderiam atracar em um determinado terminal, que o façam mediante uma restrição que limita sua carga no momento da atracação a um valor máximo. Por exemplo, se um determinado Navio A não pode atracar no Terminal X porque seu calado não é compatível, é possível flexibilizar esta diretiva ao permitir que o Navio A atraque somente se estiver com, no máximo, 50% da sua carga total. Caso ele esteja com

carga acima desse valor, então a restrição torna-se ativa e o Navio A não poderá atracar no Terminal X. Esta flexibilização faz com que a matriz $A(i,k)$ deixe de ser estritamente binária (pode ou não pode atracar) e passe a aceitar casos específicos baseados na ocupação de carga do navio.

Analogamente, para atracar em plataformas que apresentam posicionamento dinâmico (DP), os navios precisam também apresentar este sistema DP e, além disso, respeitar um limite máximo de capacidade a bordo, para não expor a manobra a riscos desnecessários. Geralmente, este valor é uma porcentagem da capacidade máxima que o navio pode carregar e, desta forma, ele só pode atracar em plataformas que apresentem posicionamento dinâmico se carregar, no máximo, essa porcentagem. Se a plataforma não apresenta DP (plataforma convencional), ela aceita atracação tanto de navios com DP quanto de navios sem este sistema (navio convencional), desde que observado um limite percentual da carga máxima. Observa-se, neste caso, que o navio poderá sempre utilizar sua capacidade máxima, desde que o observe a porcentagem máxima na hora da atracação.

O quadro 3.4 resume as regras de atracação de acordo com os tipos de plataformas e navios, com relação ao percentual de carga máxima permitida que é operado na prática.

Quadro 3.4 – Limite máximo de carga permitido para atracação, de acordo com o tipo de plataforma e navio.

		Plataforma	
		DP	Convencional
Navio	DP	50%	50%
	Convencional	30%	Não pode atracar

Para representar estas restrições, é necessário introduzir novos parâmetros e conjuntos, definidos a seguir.

Conjuntos

- C_{DP} é o conjunto de plataformas que apresentam posicionamento dinâmico;
- K_{DP} é o conjunto de navios k que apresentam posicionamento dinâmico;

- $CFlex_{ik}$ é o conjunto de terminais que permitem flexibilização de calado para atracação;

Parâmetros

- α_1^{jk} é a porcentagem da carga máxima permitida para o navio k atracar no terminal $j \in CFlex_{jk}$;
- α_2^{jk} é a porcentagem da carga máxima permitida para o navio k com DP, $k \in K_{DP}$, atracar na plataforma convencional $j \notin C_{DP}$;
- α_3^{jk} é a porcentagem da carga máxima permitida para o navio k convencional $k \notin K_{DP}$, atracar em uma plataforma convencional $j \notin C_{DP}$. Esta mesma porcentagem é válida para o caso em que o navio com DP $k \in K_{DP}$ atraca na plataforma com DP $j \in C_{DP}$.

Assim, para o caso em que o terminal apresenta restrições de calado em termos de uma porcentagem da carga máxima, as restrições são definidas da seguinte forma:

$$y_{jk} \leq (\alpha_1^{jk} Cap_k + d_j) + \left(1 - \sum_{i \in (C \cup S_k)} x_{ijk} \right) M \quad \begin{array}{l} \forall (j,k) \in CFlex_{jk} \\ \forall (j,k) \in A(j,k) \\ \forall k \in K \end{array} \quad (3.22)$$

Para o primeiro caso das restrições de posicionamento dinâmico, em que um navio com DP atraca em uma plataforma convencional, a restrição pode ser escrita da seguinte forma:

$$y_{jk} \leq (\alpha_2^{jk} Cap_k + d_j) + (1 - \alpha_2^{jk}) Cap_k \left(1 - \sum_{i \in C} x_{ijk} \right) \quad \begin{array}{l} \forall j \notin C_{DP} \\ \forall k \in K_{DP} \end{array} \quad (3.23)$$

Para o segundo caso, em que um navio convencional atraca em uma plataforma convencional, tem-se a seguinte restrição:

$$y_{jk} \leq (\alpha_3^{jk} Cap_k + d_j) + (1 - \alpha_3^{jk}) Cap_k \left(1 - \sum_{i \in C} x_{ijk} \right) \quad \begin{array}{l} \forall j \notin C_{DP} \\ \forall k \notin K_{DP} \end{array} \quad (3.24)$$

Para o terceiro caso, no qual um navio com DP atraca em uma plataforma também com DP, a restrição é similar a anterior, com exceção apenas do domínio dos conjuntos:

$$y_{jk} \leq (\alpha_3^{jk} Cap_k + d_j) + (1 - \alpha_3^{jk}) Cap_k \left(1 - \sum_{i \in C} x_{ijk} \right) \quad \begin{array}{l} \forall j \in C_{DP} \\ \forall k \in K_{DP} \end{array} \quad (3.25)$$

Para o quarto caso, em que um navio convencional não pode atracar em uma plataforma com DP, restringe-se esta atracação da seguinte forma:

$$\sum_{i \in C} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in C_{DP}, \forall k \notin K_{DP} \quad (3.26)$$

3.3.2 Restrições adicionais para representar incompatibilidade entre produtos

O modelo anterior pode ser adaptado para considerar incompatibilidade de produtos introduzindo um novo conjunto e uma nova variável de decisão da seguinte maneira:

Conjunto

- I é o conjunto que representa a incompatibilidade de pares de produtos. Para cada par (i, j) em I , o produto produzido no nó i é incompatível com o produto produzido no nó j ;

Variável

- z_{ijk} é uma variável binária que controla as visitas consecutivas, não necessariamente imediatamente consecutivas, que envolvam produtos incompatíveis, definida para $(i, j) \in I$, que assume valor igual a 1 se i é visitado antes de j , e 0 caso contrário;

Em alguns casos reais, um navio pode realizar várias coletas consecutivas de petróleo em plataformas. Dentro deste contexto, considera-se a possibilidade de mistura destes produtos dentro do mesmo compartimento do navio, de forma a acondicionar as cargas coletadas. No entanto, podem existir produtos incompatíveis, ou seja, que não podem ser misturados, dados os requisitos técnicos da refinaria ou a própria composição química dos produtos a serem misturados.

Ao considerar que existem 2 produtos incompatíveis, lança-se mão da variável z_{ijk} que controla as visitas consecutivas em i e j de forma análoga à variável x_{ijk} , a menos do conjunto de atuação, uma vez que a variável z_{ijk} atua no conjunto I de pontos operacionais (plataformas) incompatíveis e que a variável x_{ijk} opera em visitas imediatamente consecutivas. É importante notar que só é possível incompatibilizar os produtos utilizando as plataformas, pois cada uma delas oferece um produto único, conforme já foi discutido na introdução desta seção.

Assim, as restrições (3.27) e (3.28) forçam a variável z_{ijk} a assumir o valor 1, caso a plataforma i seja visitada antes da plataforma j , que são incompatíveis. Caso contrário, a variável z_{ijk} assume o valor 0.

$$z_{ijk} \geq \frac{f_{jk} - f_{ik}}{M} + \left(\sum_{l \in (s_k \cup C)} x_{ilk} + \sum_{l \in (s_k \cup C)} x_{ljk} \right) - 2 \quad \forall (i, j) \in I \quad \forall k \in K \quad (3.27)$$

$$z_{ijk} \leq 1 - \left(\frac{f_{ik} - f_{jk}}{M} \right) + \left(2 - \sum_{l \in (s_k \cup C)} x_{ilk} - \sum_{l \in (s_k \cup C)} x_{ljk} \right) \quad \forall (i, j) \in I \quad \forall k \in K \quad (3.28)$$

As restrições (3.29), por sua vez, garantem que se os produtos das plataformas i e j forem incompatíveis e o produto da plataforma i for carregado antes do produto da plataforma j , então o produto da plataforma i deve ser descarregado antes que o produto da plataforma j seja carregado. Matematicamente, tem-se, se $z_{ijk} = 1$: $f_{ik} < f_{jk} \Rightarrow f_{(n+i)k} < f_{jk}$.

$$(1 - z_{ijk})M > f_{(n+i)k} - f_{jk} + \left(\sum_{l \in (e_k \cup C)} x_{ilk} + \sum_{l \in (e_k \cup C)} x_{ljk} - 2 \right)M \quad \forall (i, j) \in I \quad k \in K \quad (3.29)$$

3.3.3 Fixação de variáveis para eliminar arcos inexistentes da rede

Uma forma de reduzir a complexidade do problema é eliminar algumas variáveis x_{ijk} correspondentes a arcos inexistentes da rede construída pelo modelo, isto é, fixá-las em $x_{ijk} = 0$. Algumas destas formas de pré-fixar ou eliminar variáveis do modelo são apresentadas a seguir.

$$\text{i.} \quad x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in \{s_1, s_2, \dots, s_{k-1}, s_{k+1}, \dots, s_{|K|}\} \quad \forall j, \forall k \quad (3.30)$$

$$\text{ii.} \quad x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in \{e_1, e_2, \dots, e_{k-1}, e_{k+1}, \dots, e_{|K|}\} \quad \forall i, \forall k \quad (3.31)$$

$$\text{iii. } x_{h+n,h,k} = 0 \quad \forall h \in C_1, \forall k \quad (3.32)$$

$$\text{iv. } x_{s_k,h,k} = 0 \quad \forall h \in C_2, \forall k \quad (3.33)$$

$$\text{v. } x_{h,e_k,k} = 0 \quad \forall h \in C_1, \forall k \quad (3.34)$$

$$\text{vi. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i = j \quad (3.35)$$

$$\text{vii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, j, k : a_i + ts_{ik} + \frac{\text{dist}_{ij}}{v_k} > b_j, \text{dist}_{ij} > 0 \quad (3.36)$$

$$\text{viii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall (i, j) \in C_1, \forall k : d_i + d_j > \text{Cap}_k \quad (3.37)$$

$$\text{ix. } x_{ijk} = 0 \quad \forall (i, j) \in C_1, \text{dist}_{ij} = 0, a_i \geq b_i \quad (3.38)$$

$$\text{x. } x_{ijk} = 0 \quad \forall (i, j) \in C_2, \text{dist}_{ij} = 0, a_i \geq b_i \quad (3.39)$$

$$\text{xi. } y_{ik} = 0 \quad \forall i \in s_k, \forall k \quad (3.40)$$

$$\text{xii. } y_{ik} = 0 \quad \forall i \in e_k, \forall k \quad (3.41)$$

$$\text{xiii. } y_{ik} = 0 \quad \text{Cap}_k < |d_i|, \forall i \in C, \forall k \quad (3.42)$$

$$\text{xiv. } f_{ik} = a_i \quad \forall i \in s_k \quad (3.43)$$

$$\text{xv. } x_{ijk} = 0 \quad \text{Cap}_k < |d_i + d_j|, \forall i, j \in C_2, \forall k \quad (3.44)$$

$$\text{xvi. } x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in s_k, \forall i, k \quad (3.45)$$

$$\text{xvii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in e_k, \forall j, k \quad (3.46)$$

$$\text{xviii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i \notin C_1, \forall j \in e_k, \forall k \neq j - 2n - |K| \quad (3.47)$$

$$\text{xix. } x_{ijk} = 0 \quad d_i > \text{Cap}_k, \forall i \in C_1, \forall j, k \quad (3.48)$$

$$\text{xx. } x_{ijk} = 0 \quad d_j > \text{Cap}_k, \forall j \in C_1, \forall i, k \quad (3.49)$$

$$\text{xxi. } x_{ijk} = 0 \quad |d_i| > \text{Cap}_k, \forall i \in C_2, \forall j, k \quad (3.50)$$

$$\text{xxii. } x_{ijk} = 0 \quad |d_j| > \text{Cap}_k, \forall j \in C_2, \forall i, k \quad (3.51)$$

$$\text{xxiii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, k \in A(i, k), \forall i, k \notin \text{CFlex}_{ik} \quad (3.52)$$

$$\text{xxiv. } x_{ijk} = 0 \quad \forall j, k \in A(j, k), \forall j, k \notin CFlex_{jk} \quad (3.53)$$

$$\text{xxv. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C_{DP}, \forall k \notin K_{DP} \quad (3.54)$$

$$\text{xxvi. } x_{jik} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C, a_j > b_i, \forall k \quad (3.55)$$

$$\text{xxvii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C_1, d_i > \alpha_2^{jk} Cap_k, dist_{ij} > 0, k \in K_{DP} \quad (3.56)$$

$$\text{xxviii. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C_2, |d_i| > \alpha_2^{jk} Cap_k, dist_{ij} > 0, k \in K_{DP} \quad (3.57)$$

$$\text{xxix. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C_1, d_i > \alpha_3^{jk} Cap_k, dist_{ij} > 0, k \notin K_{DP} \quad (3.58)$$

$$\text{xxx. } x_{ijk} = 0 \quad \forall i, \forall j \in C_2, |d_i| > \alpha_3^{jk} Cap_k, dist_{ij} > 0, k \notin K_{DP} \quad (3.59)$$

A fixação (3.30) preserva apenas os arcos do depósito de origem que correspondem ao navio que realiza a entrega, zerando os demais arcos. O mesmo raciocínio é utilizado em (3.31), porém com os depósitos de destino. A fixação (3.32) elimina os arcos que ligam um nó de entrega (terminal) ao seu respectivo nó de coleta (plataforma). Como todas as coletas devem ser realizadas antes das respectivas entregas, esta fixação elimina os arcos que fazem a ligação oposta. A fixação (3.33) impede que os arcos que ligam os depósitos de origem diretamente aos terminais sejam considerados, uma vez que o navio inicia o horizonte de planejamento sem carga a bordo e, portanto, deve visitar inicialmente uma plataforma para realizar a primeira coleta. Similarmente, a fixação (3.34) desconsidera os arcos que ligam as plataformas diretamente aos depósitos de destino, uma vez que o navio deve encerrar o horizonte de planejamento sem carga. A fixação (3.35) elimina os arcos que conectam um determinado nó a ele mesmo. A fixação (3.36) elimina os arcos i, j visitados consecutivamente, no qual o limitante inferior da janela de tempo de i somado ao tempo de serviço no nó i e ao tempo de deslocamento de i para j seja maior que o limitante superior da janela de tempo do nó j , ou seja, esta fixação elimina visitas que *a priori* não respeitam a janela de tempo. Por sua vez, a fixação (3.37) elimina os arcos que conectam visitas consecutivas a plataformas cujas demandas somadas *a priori* superam a capacidade do navio que as realizam.

Para o caso de duas visitas consecutivas a uma mesma plataforma, a fixação (3.38) elimina os arcos que conectam a segunda coleta à primeira coleta, desde que não haja sobreposição entre as janelas de tempo das coletas consecutivas. A fixação (3.39) segue o

mesmo raciocínio para as entregas nos terminais. As fixações (3.40) e (3.41) garantem que a carga a bordo do navio k é nula nos depósitos iniciais e finais, respectivamente. A fixação (3.42) garante que a carga a bordo de um navio k é nula ao sair do ponto operacional i , caso ele não seja capaz de coletar ou entregar aquela quantidade d_i . A fixação (3.43) define o instante de início de serviço no depósito inicial como o início da respectiva janela de tempo a_i , garantindo que o modelo não tenha que tomar esta decisão para cada um dos depósitos. A fixação (3.44) elimina os arcos que conectam duas entregas consecutivas cujas quantidades somadas superam a capacidade do navio, de tal forma que tais entregas nunca serão realizadas consecutivamente pelo mesmo navio. As fixações (3.45) e (3.46) garantem que nenhum arco entre nos depósitos iniciais e que nenhum arco saia dos depósitos finais, respectivamente. Apesar de existir uma restrição que garante isto, as eliminações de variáveis reduzem o tamanho do problema já no pré-processamento.

Como cada um dos navios possui seu próprio depósito final artificial, e a fixação (3.47) garante que todo navio k esteja conectado somente ao seu respectivo depósito final ao fim do horizonte de planejamento. Esta fixação é uma forma geral de escrever a fixação (3.31). As fixações de (3.48) a (3.51) garantem que o navio nunca visitará um de coleta, ou um nó de entrega, caso ele não tenha capacidade suficiente para coletar ou entregar este lote. As fixações (3.52) e (3.53) garantem que um navio não entrará nem sairá, respectivamente, dos terminais em que ele não pode atracar devido ao calado. Já a fixação (3.54) define que um navio não pode atracar em uma plataforma que apresenta posicionamento dinâmico, caso ele não possa. Se não houver sobreposição entre as janelas de tempo de dois pontos operacionais, a fixação (3.55) assegura que não haverá um arco que conecta diretamente a segunda visita à primeira, uma vez que as próprias janelas de tempo impedem tal manobra. As fixações de (3.56) a (3.59) garantem que o navio não fará uma segunda coleta, caso sua capacidade esteja restrita para os casos de posicionamento dinâmico em que se utilizam os casos descritos anteriormente com α_2^{jk} e α_3^{jk} .

3.3.4 Regras práticas de operação

Uma forma de representar algumas regras utilizadas na prática pelos operadores é incluir restrições com perda de generalidade ao modelo. Um exemplo é a situação na qual o navio não realiza mais do que duas coletas ou duas entregas consecutivas

na mesma rota. Assim, uma forma de limitar a duas visitas consecutivas realizadas a plataformas ou terminais por um navio é escrever as seguintes restrições:

$$x_{ijk} + x_{jlk} + x_{lmk} \leq 2 \quad \forall i, j, l, m \in C_1, \forall k \in K \quad (3.60)$$

$$x_{ijk} + x_{jlk} + x_{lmk} \leq 2 \quad \forall i, j, l, m \in C_2, \forall k \in K \quad (3.61)$$

As restrições (3.60) restringem o navio a realizar até duas visitas consecutivas em plataformas. Similarmente, as restrições (3.61) o fazem para os terminais. Estas considerações estão incorporadas no modelo através de penalizações na FO sobre a atracação consecutivas, que é apresentado em detalhes posteriormente na seção 3.3.5.

Outra regra prática de operação é garantir que o navio não realize coletas e entregas em pontos com distância muito grande entre si como ocorreria, por exemplo, ao realizar uma visita a um ponto operacional no Sul do país e em seguida uma visita no Nordeste. Desta forma, é possível definir restrições da seguinte forma:

$$x_{ijk} = 0 \quad , \text{ se } dist_{ij} > D \quad (3.62)$$

onde D representa uma distância muito grande. Esta regra prática, por sua vez, está considerada implicitamente na matriz $dist(i, j)$.

3.3.5 Incorporação dos custos de combustível e penalização por atracações consecutivas na função objetivo

Conforme o modelo evoluiu com a incorporação de novos dados de custos de consumo de combustível fornecidos pela empresa decorrentes de contratos de afretamento, algumas adaptações foram realizadas na função objetivo para capturar estas novas características. Inicialmente, definem-se os novos parâmetros e variáveis a serem utilizados:

Parâmetros

- Cm_k é o consumo diário de combustível do navio k em movimento em m^3 ;
- Cs_k é o consumo diário de combustível do navio k enquanto está parado (*stand-by*) em m^3 ;
- Ca_j é o custo fixo de atracação na plataforma j , em R\$. Caso o navio realize coletas consecutivas na mesma plataforma j , o custo fixo é pago somente uma vez, quando o navio foi atracado;
- β é a penalização imposta às visitas consecutivas de um mesmo navio a plataformas diferentes;

Variável

- Fa_{ijk} é uma variável auxiliar do modelo que representa a atracação consecutiva da plataforma i para a plataforma j com o navio k , onde $i \neq j$;

Uma primeira adaptação da função objetivo (3.1), que minimiza a distância percorrida, incorporou as parcelas de consumo de combustível, originando a FO dada por (3.63).

$$\sum_{k \in K} Cs_k (b_{e_k} - a_{s_k}) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} (Cm_k - Cs_k) \frac{dist_{ij}}{v_k} x_{ijk} \quad (3.63)$$

Esta FO representa o consumo de combustível por navio em um roteiro de coletas nas plataformas e entregas nos terminais. A função é separada em duas parcelas, na qual a primeira registra um custo fixo do navio parado, definido pelo contrato de afretamento, e a segunda representa o consumo variável de combustível, proporcional ao deslocamento realizado pelo navio. O objetivo é, portanto, minimizar o custo total do roteiro.

Posteriormente, a função objetivo incorporou também o custo fixo de atracação Ca_j descrito acima, de forma a contabilizar cada uma das atracções realizadas em plataformas no custo total. Além disso, foi também adicionada uma penalização referente a atracções consecutivas em diferentes plataformas, dada pelo termo que contém a nova variável Fa_{ijk} . A constante β pode ser ajustada de forma a representar a correta penalização para este caso, em unidades monetárias. A função (3.64) é resultante da incorporação destes novos termos, além do custo variável de combustível. A parcela de custo fixo foi abandonada

nesta nova função por se tratar de uma parcela constante e, portanto, irrelevante para o problema de otimização.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} (Cm_k - Cs_k) \frac{dist_{ij}}{v_k} x_{ijk} + \sum_{i \in (S \cup C)} \sum_{j \in C} \sum_{k \in K} Ca_j x_{ijk} + \beta \sum_{i \in C_1} \sum_{j \in C_1} \sum_{k \in K} Fa_{ijk} \quad (3.64)$$

A restrição adicional (3.65) força o valor da variável auxiliar Fa_{ijk} a assumir o valor 1, caso exista o arco ligando duas plataformas i e j , $i \neq j$, consecutivamente para coletas sucessivas, e o valor 0, caso contrário. Esta é a parcela que está sendo penalizada na função objetivo (3.64).

$$x_{ijk} \leq Fa_{ijk} \quad \forall i, j \in C_1, i \neq j, dist_{ij} > 0 \quad (3.65)$$

O modelo pode ainda ser modificado para considerar a ocupação dos berços em terminais. No entanto, esta consideração é sugerida como pesquisa futura pelas seguintes razões: aumento considerável da complexidade do modelo em mãos; imprecisão nas informações e regras de atracação nos terminais e uso de um tempo padrão de 48h, por simplicidade, na gestão das filas de atracação nos terminais.

Dada a estratégia de modelagem adotada para este problema e sua estrutura, o número de variáveis inteiras é da ordem de $|K| [2(n+|K|)]^2 \Rightarrow 4|K|(n+|K|)^2$, uma vez que uma das variáveis de decisão assume três índices dependentes do tamanho do grafo (sem considerar a fixação das variáveis) e do número de veículos disponíveis para realizar as rotas. Este modelo pode ser visto como um caso particular de PDPTW que apresenta restrições adicionais de posicionamento dinâmico, limitação de carga e incompatibilidade de produtos, entre outros. Para reduzi-lo a um PDPTW clássico, basta considerar $\alpha_1^{jk} = 1$, $\alpha_2^{jk} = 1$ e $\alpha_3^{jk} = 1$ para as restrições de posicionamento dinâmico e limitação de cargas. Como o PDPTW é *NP-difícil* do ponto de vista de teoria de complexidade, este modelo é, portanto, difícil de ser resolvido otimamente na prática, por tratar-se também de um problema *NP-difícil*, como outros problemas de roteirização com coleta e entrega e janelas de tempo (SAVELSBERGH, SOL, 1995).

Com a explicitação da modelagem matemática, é possível introduzir os experimentos computacionais que foram realizados com o modelo descrito.

4 EXPERIMENTOS COM MODELO E RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos computacionais do modelo apresentado no capítulo 3 foram realizados com dados reais, baseados em dados primários fornecidos pela própria companhia. Estes dados foram divididos em 3 conjuntos de dados, que são descritos em seções posteriores. Além disso, estes conjuntos de dados foram ganhando novos parâmetros conforme a evolução do modelo, de forma que os custos associados ao consumo de combustível dos navios foram fornecidos nos conjuntos de dados 2 e 3. Assim, a função objetivo foi adaptada para diferentes versões do modelo, conforme descrito na seção 3.3.5. A figura 4.1 apresenta uma visão consolidada dos principais conjuntos de experimentos que foram realizados neste trabalho.

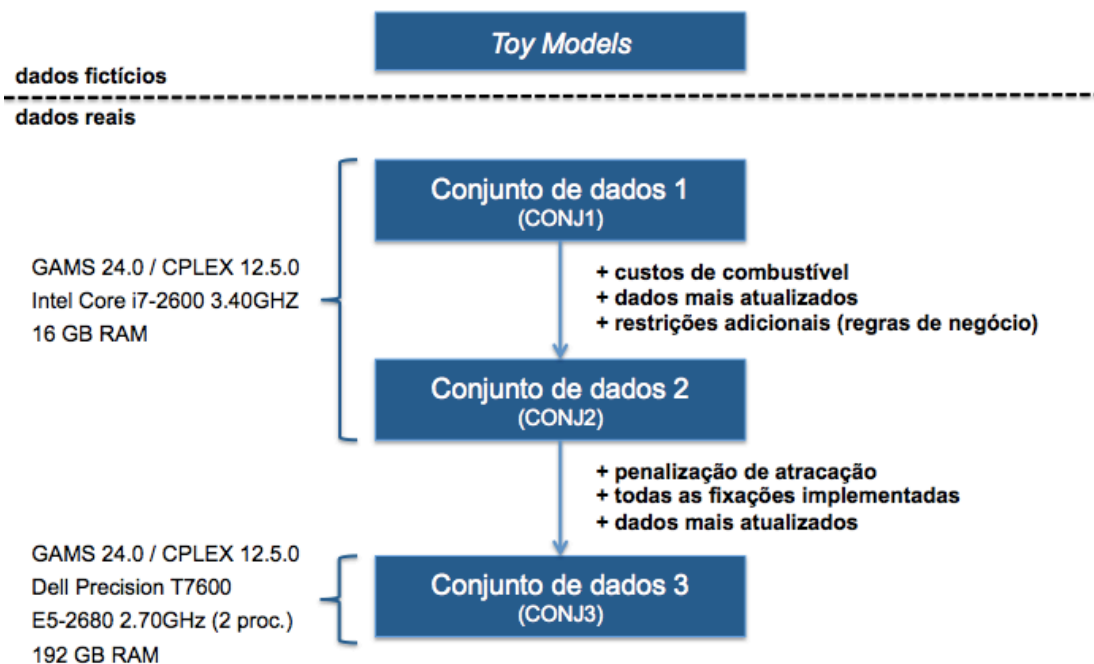


Figura 4.1 – Visão resumida dos conjuntos de dados para os experimentos computacionais

Os *toy models* e testes com o conjunto de dados 1 e 2 deste trabalho foram implementados em GAMS versão 24.0 com CPLEX 12.5.0 em computadores Dell Intel Core i7-2600 3.40GHz e 16GB de memória RAM com sistema operacional Windows 7 *Professional*. Para os testes realizados com o conjunto de dados 3 e com as respectivas heurísticas *relax-and-fix*, foi utilizada uma *workstation* Dell Precision T7600 CPU E5-2680 2.70GHz (2 processadores) e 192GB de memória RAM com sistema operacional Windows 7 *Professional*. Note que isto permitiu utilizar o melhor *hardware* disponível no laboratório para testar o conjunto de dados mais recente e garantir também o poder de comparação entre o desempenho das heurísticas e o modelo “puro” baseado no conjunto de dados 3, mesmo conjunto no qual as heurísticas *relax-and-fix* foram implementadas. O número de *threads* (núcleos de processador) do CPLEX foi configurado de tal forma a aproveitar o máximo de processamento disponível para cada máquina com a licença utilizada.

4.1 *Toy Models*⁶

Para testar o funcionamento do modelo dado por (3.1)-(3.21) e as restrições de incompatibilidade de produtos, dadas por (3.27)-(3.29), inicialmente foram gerados arbitrariamente 11 casos ilustrativos de teste, com dados que pudessem ser verificados manualmente, de tal forma a fornecer indícios da consistência e do correto funcionamento do modelo. Nestes testes, foram valorizadas situações de incompatibilidade entre 2 ou 3 produtos oferecidos pelas plataformas e exploradas as impossibilidades de atracação para alguns navios a pontos operacionais, com vistas a verificar o comportamento do modelo no tratamento destas restrições. Foram considerados custos fixos de viagem em 10 unidades, capacidade dos navios variando entre 10, 20 e 30 unidades, dependendo do caso; o tempo de viagem entre os pontos foi definido como 1 unidade e o tempo de serviço em qualquer nó como 2 unidades. A demanda, por sua vez, variou entre 10, 12 e 14 unidades e as janelas de tempo definidas arbitrariamente no intervalo [0,30]. Note que estes valores são hipotéticos e arbitrários.

Os casos de testes foram divididos em dois conjuntos principais – um com 2 navios, 3 plataformas e 3 terminais (casos de teste de 1 a 7) e um segundo com 3 navios, 6 plataformas e 6 terminais (casos de teste de 8 a 11). Por simplicidade, cada plataforma envolve apenas uma coleta e cada terminal envolve apenas uma entrega, ou seja, os

⁶ Termo utilizado em Pesquisa Operacional para testes de tamanho reduzido com objetivo de validar o modelo matemático desenvolvido.

exemplares possuem 3 pares coleta/entrega. Com o intuito de facilitar a interpretação dos *toy models*, as figuras 4.2 e 4.3 ilustram a estrutura de rede dos casos.

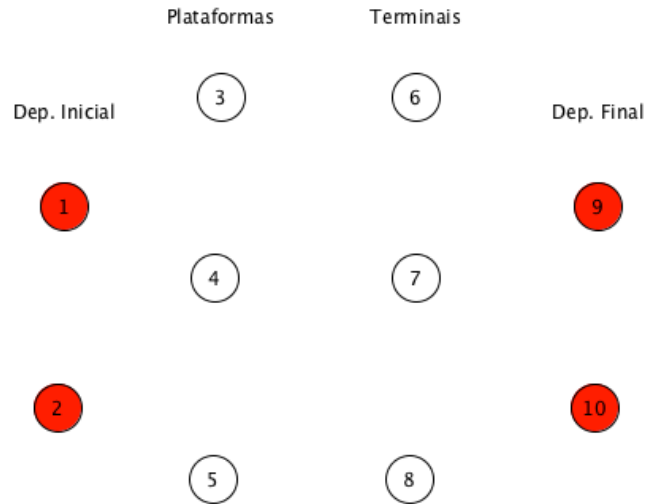


Figura 4.2 – Ilustração da estrutura de rede para os casos dos testes de 1 a 7.

Fonte: Elaborado pelo autor.

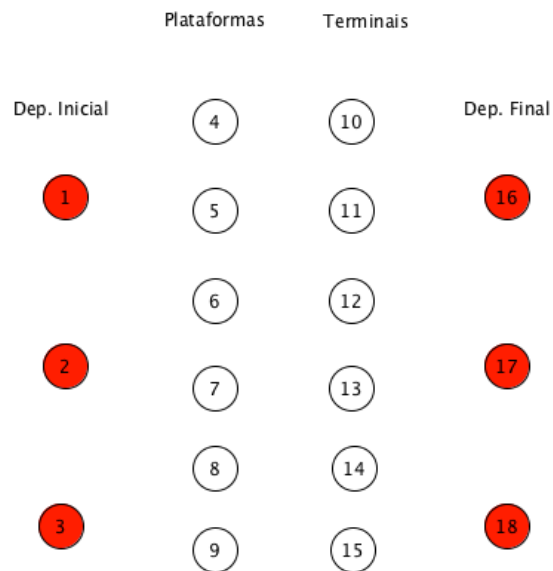


Figura 4.3 - Ilustração da estrutura de rede para os casos dos testes de 8 a 11.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, é possível analisar em mais detalhes as principais características destes casos, que se encontram sumarizadas no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Principais características dos casos de teste para implementação dos *toy models*

# Caso de Teste	# Navios	# Plataformas	# Terminais	# Produtos incompatíveis	Impossibilidade de atracar ⁷	
					Navio	Ponto Operacional
1	2	3	3	Não há	-	-
2	2	3	3	2	-	-
3	2	3	3	2	1	1 e 3
4	2	3	3	3	1	3 e 4
5	2	3	3	3	1	3 e 4
6	2	3	3	Não há	1	3 e 4
7	2	3	3	Não há	1	3 e 4
8	3	6	6	3	1	4 e 6
					2	6
9	3	6	6	Não há	1	5
					2	6
					3	8
10	3	6	6	3	1	4
11	3	6	6	6	1	4 e 5
					2	5 e 6
					3	9

Para o teste 1, foram inseridas duas demandas dentro da mesma janela de tempo para os terminais, para que fosse possível apurar o comportamento do modelo com relação a estas entregas. A figura 4.4 fornece o resultado gráfico da solução ótima deste caso, no qual os arcos azuis representam a rota do navio 1, enquanto os arcos verdes representam a do navio 2.

⁷ Nesta coluna, os números correspondem aos valores nominais dos pontos operacionais e navios, não à quantidade de cada um deles.

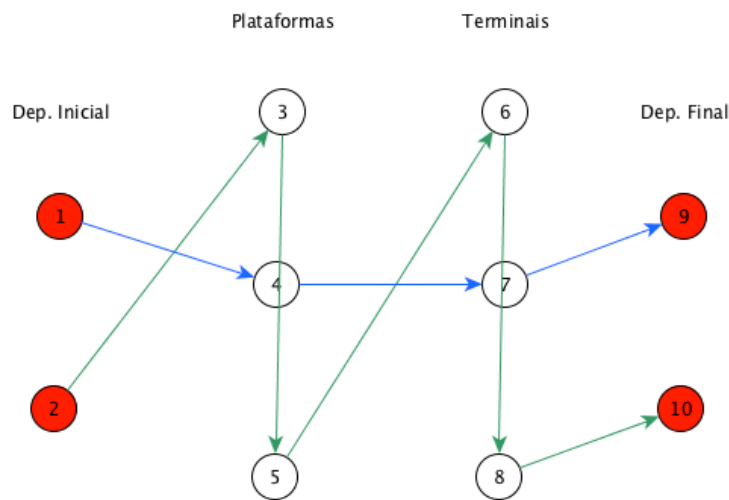


Figura 4.4 – Resultado gráfico do teste 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 2, as demandas dentro da mesma janela de tempo foram mantidas, agora adicionando-se produtos incompatíveis, representados pelos nós 3 e 5. A figura 4.5 mostra a solução ótima para o teste 2. Note que a solução apresentada neste teste é diferente da solução do teste 1 pois agora os produtos ofertados pelas plataformas 3 e 5 são incompatíveis e não podem ser agregados em coletas imediatamente consecutivas na mesma rota. Na solução, o navio 1 coleta em 3 e entrega em 6 antes de coletar em 5 e entregar em 8.

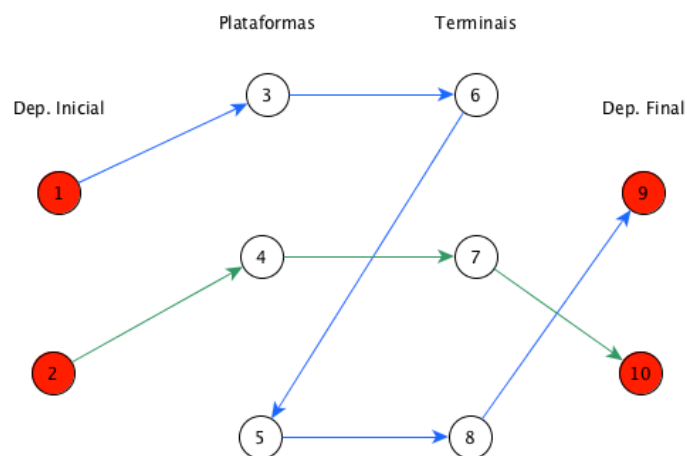


Figura 4.5 - Resultado gráfico do teste 2.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teste 3, foi mantida a sobreposição de janelas de tempo para as entregas 6 e 7, adicionando-se produtos incompatíveis representados pelos nós 3 e 4. Há também impossibilidade de atracação do navio 1 à plataforma 4. A figura 4.6 apresenta o resultado gráfico para este teste. Esta solução é a mesma apresentada pelo teste 1, pois ela respeita as novas características do conjunto de dados e, portanto, configura-se também como uma solução ótima para o teste 3.

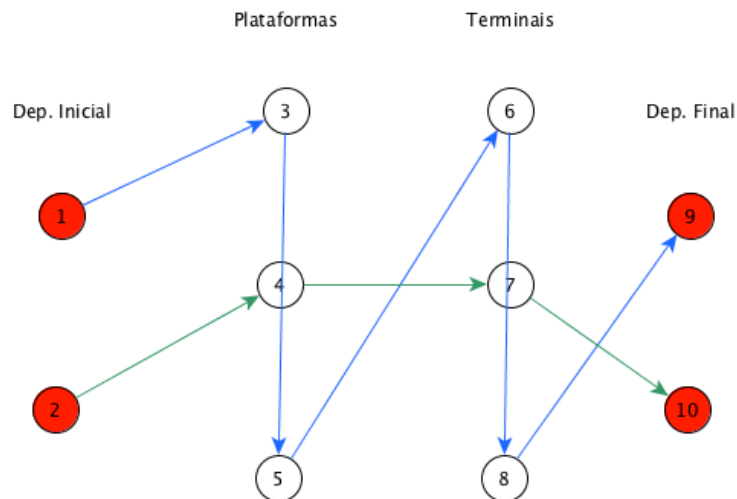


Figura 4.6 - Resultado gráfico do teste 3.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 4, a sobreposição de janelas de tempo também foi mantida para 2 entregas, agora para os nós 7 e 8. A figura 4.7 apresenta o resultado gráfico para este caso de teste. Note que esta solução é diferente da apresentada no teste 3, pois os terminais que apresentam sobreposição de janelas de tempo mudaram. Agora, os terminais 7 e 8 não podem estar na rota do mesmo navio, pois violariam a restrição de janela de tempo de entrega para estes terminais. Note que o terminal 8 é servido pelo navio 1 e o terminal 7 é servido pelo navio 2, o que permite realizar as entregas dentro das janelas impostas.

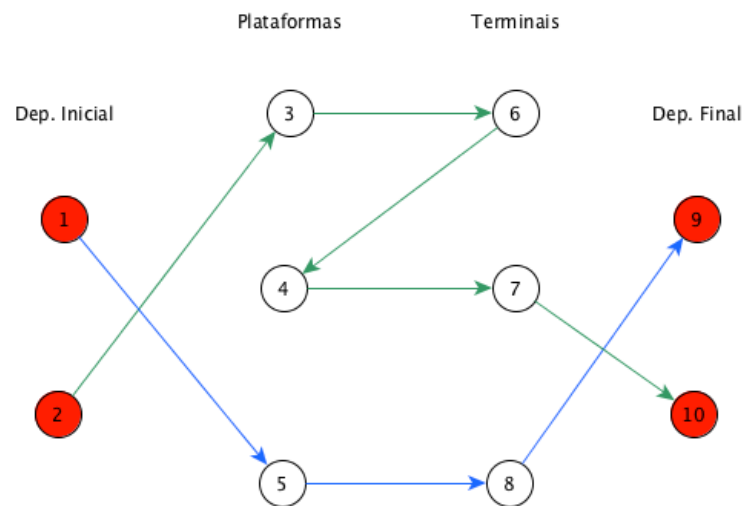


Figura 4.7 - Resultado gráfico do teste 4.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 5, a capacidade do navio 2 foi dimensionada para ser menor do que apenas uma das 3 demandas (no caso, a representada pelo nó 5 nas figuras). O resultado gráfico é apresentado na figura 4.8. Note que o resultado gerado por este teste é idêntico ao obtido no caso 4, uma vez que aquela solução é também factível e ótima para o teste 5, uma vez que o navio 1 já havia sido selecionado para realizar a coleta do nó 5. Do ponto de vista de solução, as alterações dos dados do teste não tiveram impacto no modelo.

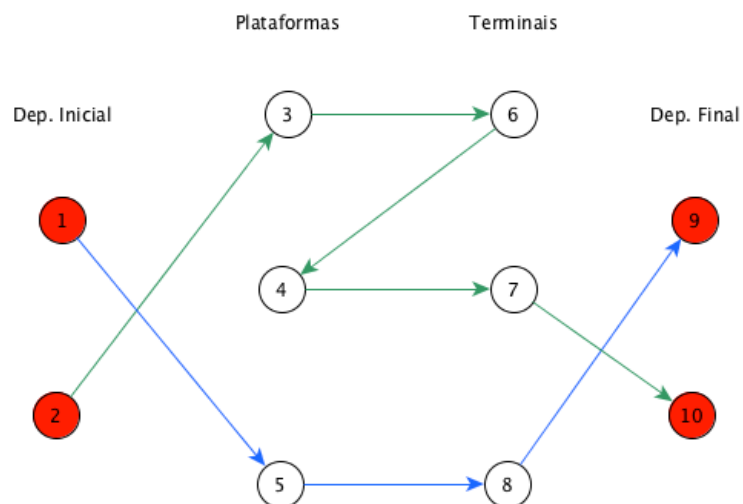


Figura 4.8 - Resultado gráfico do teste 5.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teste 6, não houve adições além das descritas no quadro 4.1. Logo, a figura 4.9 apresenta o resultado gráfico para este caso de teste. Note que o navio 1 não realiza nenhuma coleta e desloca-se diretamente para seu nó de saída (depósito final).

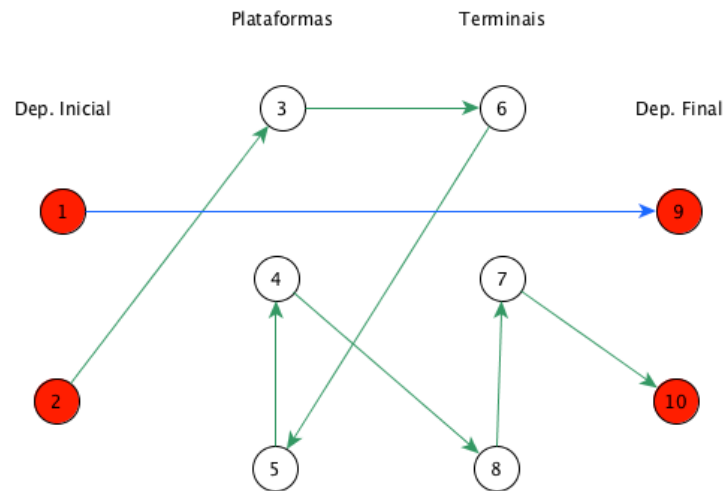


Figura 4.9 - Resultado gráfico do teste 6.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 7, as janelas de tempo foram apertadas de tal forma a deixar o problema propositalmente infactível. Portanto, mostrou-se corretamente que estas janelas de tempo estreitas infactibilizam o problema para o horizonte de planejamento desejado.

No teste 8, não houve novas considerações além das realizadas no quadro 4.1. A figura 4.10, portanto, apresenta o resultado gráfico deste caso de teste. Repare que agora a cor roxa representa a rota do navio 3. O nó 6, por exemplo, não pode ser visitado pelos navios 1 e 2, portanto o navio que realiza a coleta desta plataforma é o navio 3. Além disso, o navio 2 não é utilizado na solução, pois a capacidade dos navios 2 e 3 e as janelas de tempo impostas no teste permitem que apenas dois navios realizem todas as operações.

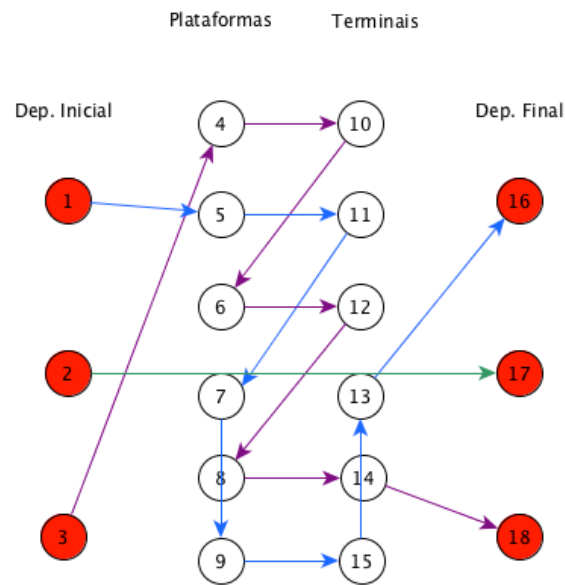


Figura 4.10 - Resultado gráfico do teste 8.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 9, as capacidades dos navios foram alteradas para formar uma frota heterogênea e infactibilizar a entrega das demandas dentro do horizonte de planejamento. Como esperado, restrições apertadas de capacidade dos navios tornaram o problema infactível.

Para o teste 10, os navios 1 e 2 foram designados com capacidade suficiente para atender a toda a demanda. A figura 4.11, portanto, apresenta o resultado gráfico deste caso de teste. Conforme esperado, nesta solução o navio 3 é despachado diretamente para o depósito final, o que minimiza o custo da solução uma vez que os dois navios são capazes de realizar todas as operações designadas.

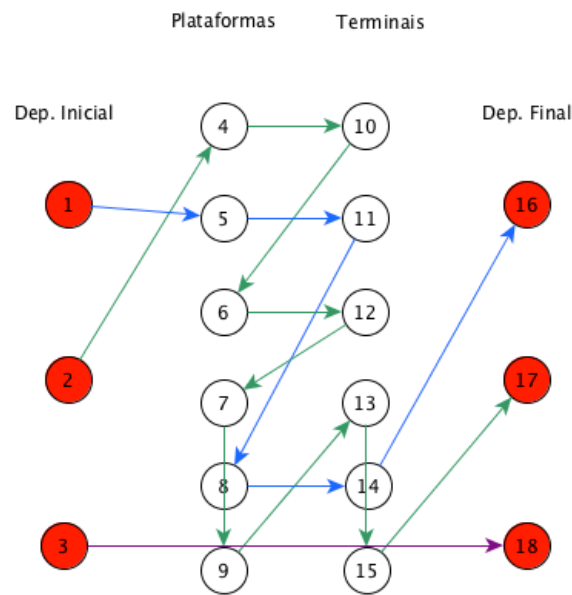


Figura 4.11 - Resultado gráfico do teste 10.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 11, além de todos os produtos serem incompatíveis, duas demandas foram posicionadas dentro da mesma janela de tempo. A figura 4.12, portanto, apresenta o resultado gráfico deste caso de teste. Note que nesta solução nenhum navio realiza duas coletas sucessivas, pois todos os produtos apresentam incompatibilidade entre si. Além disso, o navio 2 também não é utilizado na solução, pois as janelas de tempo dos pontos operacionais e as capacidades dos navios 1 e 2 permitem que eles realizem todas as operações.

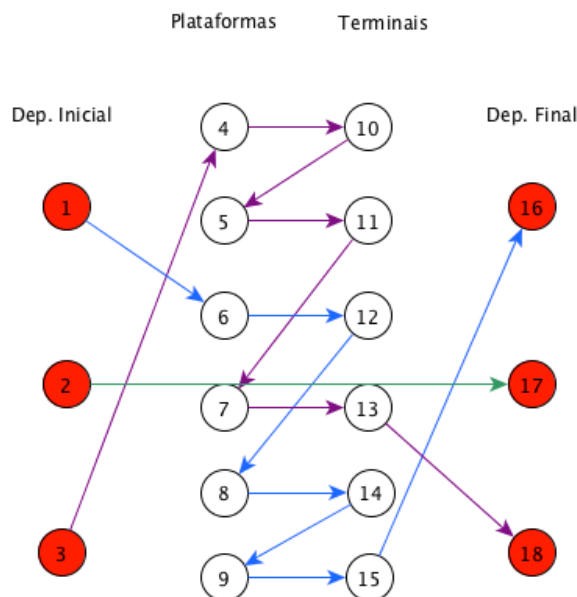


Figura 4.12 - Resultado gráfico do teste 11.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados com testes de 1 a 11 mostram que o modelo se comporta corretamente, conforme esperado. As restrições de incompatibilidade de produtos, dadas por (3.27)-(3.29), foram testados somente para os *toy models*, uma vez que nos experimentos com dados reais a seguir, algumas regras de negócio permitem certa flexibilidade para acomodar produtos incompatíveis em compartimentos separados, conforme discutido anteriormente. Todos os problemas dos testes de 1 a 11 foram resolvidos otimamente em menos de 5 segundos. As soluções ótimas obtidas em cada teste mudaram de forma coerente ao que se esperava com a alteração dos dados de entrada do problema.

4.2 Experimentos com dados reais

Os experimentos realizados com dados reais foram baseados em arquivos fornecidos pela empresa. Para isto, foram criados 3 conjuntos de dados. O primeiro deles contempla dados históricos da operação da companhia, cujo principal objetivo é testar a validade do modelo (3.1)-(3.21) diante de dimensões reais. O segundo conjunto de dados contém o consumo de combustível e utilizam a FO dada por (3.63). Além disso, incluem também informações de posicionamento dinâmico e flexibilização de calado, dados pelas restrições (3.22)-(3.26). Por fim, o terceiro conjunto de dados inclui tudo o que há no segundo conjunto de dados e foi testado com a FO dada por (3.64), pois inclui custo fixo de atracação

em plataformas e uma penalização para coletas consecutivas. Este conjunto de dados também apresenta a família de restrições dada por (3.65).

4.2.1 *Conjunto de dados 1*

Para este conjunto de dados foi implementado o modelo definido por (3.1)-(3.21), sem incluir nenhuma das restrições adicionais descritas no capítulo 3. A partir de uma lista com um total de 63 pares coleta/entrega e 33 navios disponíveis, constituída de dados históricos reais da companhia, foram criados inicialmente 11 exemplares de tamanho reduzido, com o objetivo de verificar o comportamento do modelo em posse de dados reais, principalmente no que se refere a sua capacidade de fornecer uma solução ótima, ou pelo menos próxima da ótima em um limite de tempo aceitável. Desta forma, buscou-se analisar para quais tamanhos do problema era possível encontrar uma solução ótima e para quais tamanhos de problema era possível obter pelo menos uma solução factível.

Todos os exemplares foram batizados seguindo o número de pares coleta/entrega (n) que ela incorpora. Portanto, o exemplar N6, por exemplo, contempla os 6 primeiros pares coleta/entrega apresentados na listagem de dados da empresa, o que representa um total de 12 pontos operacionais a serem visitados (6 visitas a plataformas e 6 visitas a terminais). Note que neste exemplares, a mesma plataforma pode ser visitada mais de uma vez para realizar diferentes coletas, o que também ocorre para os terminais. Além disso, o critério para gerar os exemplares foi baseado na sequência de demandas apresentada.

O quadro 4.2 sumariza os resultados obtidos a partir da experimentação computacional realizada com os 11 exemplares gerados do conjunto de dados 1, evidenciando o número de navios utilizados pela solução, de um total de 33 navios disponíveis, o número de variáveis geradas pelo modelo, o *gap* de otimalidade e o tempo computacional, em segundos, requerido para rodar a instância.

Quadro 4.2 – Resultados computacionais do conjunto de dados 1 para os exemplares de N6 a N48.

# Exemplar	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)	Tempo para encontrar primeira solução factível (s)
			Inteiras	Contínuas			
N6_CONJ1	1	150.842	200.722	205.921	0	2	1,34
N8_CONJ1	2	178.698	221.892	227.305	0	2	1,50
N10_CONJ1	3	206.872	244.068	249.745	0	13	10,33
N12_CONJ1	3	240.038	267.300	273.241	0	21	3,32
N14_CONJ1	3	272.564	291.588	297.793	0	43	13,06
N16_CONJ1	3	309.456	316.932	323.401	0	96	33,59
N18_CONJ1	4	348.644	343.332	350.065	0	158	58,50
N20_CONJ1	5	387.690	370.788	377.785	0	4.993	253,53
N22_CONJ1	6	429.948	399.300	406.561	0	867	259,78
N24_CONJ1	6	474.398	428.868	436.393	4,76	18.000	262,72
N36_CONJ1	11	793.892	628.452	637.561	23,50	18.000	1.377,29
N48_CONJ1	-	1.188.170	866.052	876.745	*	18.000	-

* Exemplares atingiram o máximo tempo de processamento sem fornecer solução factível.

É possível observar que até o exemplar N22, o modelo obteve a solução ótima em um tempo computacional relativamente baixo. Além disso, o modelo não foi capaz de encontrar uma solução factível para o exemplar N48 dentro do limite de tempo. Nota-se também o relevante crescimento do número de variáveis e restrições geradas pelo modelo, aumentando a complexidade de sua estrutura e dificuldade da sua solução.

As figuras 4.13 e 4.14 ilustram as soluções ótimas dos exemplares N6 e N12, respectivamente. A solução de N6 utilizou somente um navio, enquanto que a solução de N12 utilizou 3 navios, que estão com as respectivas rotas apresentadas na figura. Os nós em vermelho representam os depósitos de origem (*S*) e destino (*E*). Em cada um dos nós, está representada a numeração da plataforma ou terminal, o número de coletas ou entregas realizadas naquele ponto operacional e a carga total que foi coletada ou entregue. Exemplificando, na figura 4.13 a primeira escala na “Plat1”, realizada pelo navio A, consiste de 2 coletas que totalizam 80.000 m³ de petróleo. O total de visitas na “Plat1” é igual a 4, ou seja, 2 coletas consecutivas na primeira visita e 2 coletas consecutivas na segunda visita. Similarmente, o terminal “Ter1” foi visitados 3 vezes, com 2 entregas consecutivas em cada visita. Os dados de entrada do exemplar N6 estão apresentados no Apêndice A deste trabalho.

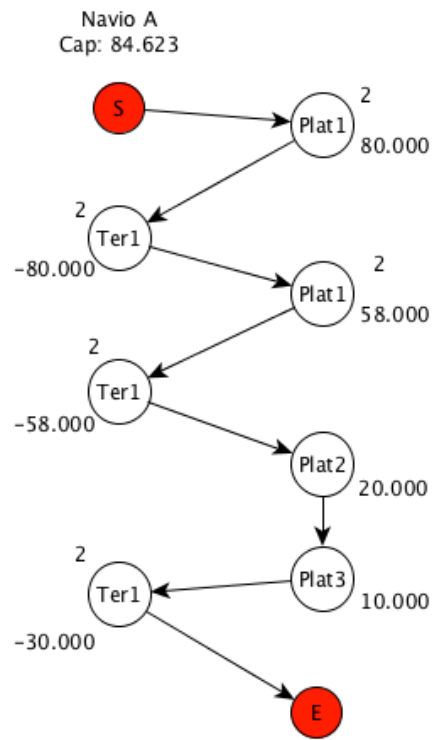
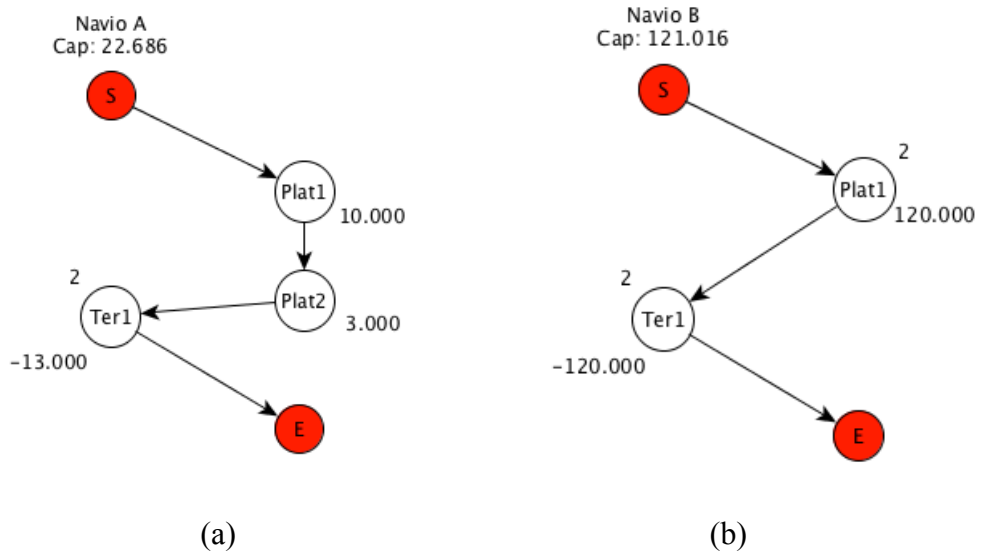


Figura 4.13 – Representação esquemática da solução do exemplar N6, que utilizou apenas o navio A.



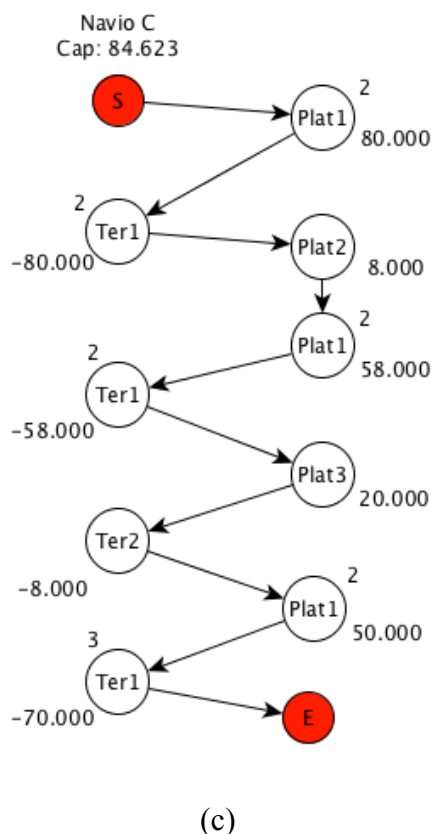


Figura 4.14 – Representação esquemática da solução do exemplar N12, que utilizou 3 navios onde (a) representa a rota do navio A; (b) a rota do navio B e (c) a rota do navio C.

Devido à estrutura do problema e à modelagem adotada, um dos principais fatores que impactam no alto crescimento do número de variáveis inteiras é a quantidade de navios disponíveis. Assim, um segundo conjunto de experimentos foi realizado com uma lista de apenas 15 navios disponíveis ($|K|=15$). Para isto, preservaram-se dentro deste conjunto os 6 navios que haviam sido utilizados na solução do exemplar N36, reportada no quadro 4.2, que é o maior exemplar que apresentou solução factível. Destaca-se que estes 6 navios utilizados nesta solução incorporam todos os navios também utilizados nos exemplares menores, ou seja, a lista de navios na solução de N36 é a mais geral e contempla os navios utilizados de N6-N36.

Desta forma, foram selecionados os exemplares N18, N20, N24 e N36 para verificar o impacto no tempo computacional, *gaps* apresentados e factibilidade da solução. É importante destacar que mesmo com a redução do número de navios, não foi possível obter solução factível para o N48. Os resultados comparativos entre estes exemplares para $|K|=33$ e $|K|=15$ estão sumarizados no quadro 4.3 que apresenta também a função objetivo para ilustrar que o mesmo valor foi obtido para os dois grupos de exemplares.

Quadro 4.3 - Resultados comparativos entre os exemplares N18, N20, N24 e N36 para $|K|=33$ e $|K|=15$.

# Exemplar	K	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)
				Inteiras	Contínuas		
N18_CONJ1	33	4	348.644	343.332	350.065	0	158
N20_CONJ1		6	387.690	370.788	377.785	0	4.993
N24_CONJ1		6	429.948	428.868	436.393	4,76	18.000
N36_CONJ1		11	474.398	628.452	637.561	23,50	18.000
N18_CONJ1_K15	15	5	88.418	65.340	67.321	0	42
N20_CONJ1_K15		6	101.832	73.500	75.601	0	115
N24_CONJ1_K15		6	132.008	91.260	93.601	0	956
N36_CONJ1_K15		13	248.600	156.060	159.121	6,93	18.000

Ao analisar o quadro 4.4 é possível notar que a redução do número de navios disponíveis $|K|$ impacta diretamente no desempenho computacional do modelo, conforme era esperado devido à redução do número de variáveis e restrições. Destaca-se que o exemplar N36 teve seu *gap* reduzido, porém produziu uma solução (FO) pior porque dos 11 navios utilizados na solução para $|K|=33$, apenas 8 deles estavam presentes na lista de navios disponíveis para o exemplar com $|K|=15$.

4.2.2 Conjunto de dados 2

Este segundo conjunto de dados fornecidos pela empresa contempla informações referentes ao custo de combustível, posicionamento dinâmico e flexibilização de calado, de tal forma que foi possível incluir as restrições (3.22)-(3.26). Além disso, a FO utilizada foi a representada por (3.63). Estes dados apresentam uma lista de 44 navios disponíveis ($|K|=44$). Um primeiro conjunto de exemplares foi definido com tamanhos N12, N16 e N22, para os quais se variou o número de navios com o intuito de verificar o impacto no desempenho computacional do modelo, de forma similar ao aplicado para o conjunto de dados 1. No conjunto de exemplares para $|K|=44$, os testes foram limitados a 10 horas (36.000). O quadro 4.4 sumariza os resultados para os testes comparativos entre estes exemplares.

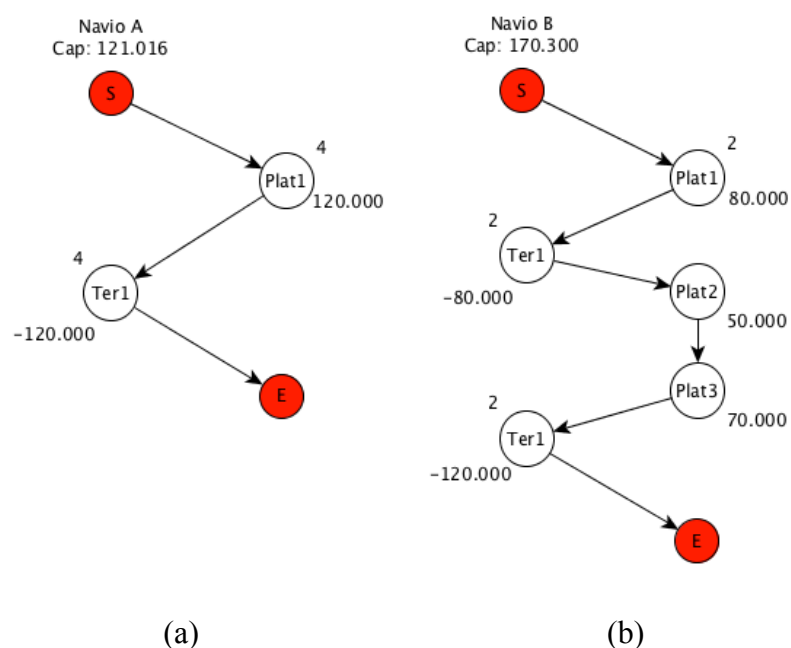
Quadro 4.4 - Resultados comparativos entre os exemplares N12, N16, N22 para diferentes valores de $|K|$.

# Exemplar	$ K $	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)
				Inteiras	Contínuas		
N12_CONJ2	44	5	423.596	551.936	561.793	57,86%	36.000
N16_CONJ2	44	6	527.116	633.600	644.161	55,91%	36.000
N22_CONJ2	44	-	703.516	766.656	778.273	*	36.000
N12_CONJ2	10	6	25.243	19.360	20.241	41,16%	18.000
N16_CONJ2	10	7	37.855	27.040	28.081	46,13%	18.000
N22_CONJ2	20	-	171.304	141.120	144.481	*	18.000

* Exemplares atingiram o máximo tempo de processamento sem fornecer solução factível.

Observa-se que o modelo tornou-se mais difícil de resolver com a inclusão das restrições adicionais de posicionamento dinâmico e flexibilização de calado e com o uso de um novo conjunto de dados. Destaca-se também que a redução do número de navios disponíveis ($|K|$) reduziu o *gap* apresentado pela solução do modelo. A redução do número de navios para $|K|=10$ e $|K|=24$ também respeitou a condição aplicada ao conjunto de dados 1 de incluir os navios que foram utilizados na solução gerada para $|K|=44$. Este aspecto reforça e motiva a aplicação de *MIP-heuristics* ao modelo em mãos.

A figura 4.15 apresenta uma representação esquemática da solução do exemplar N16 com $|K|=10$, na qual foram utilizados 7 navios. Os dados de entrada deste exemplar estão apresentados no Apêndice B deste trabalho.



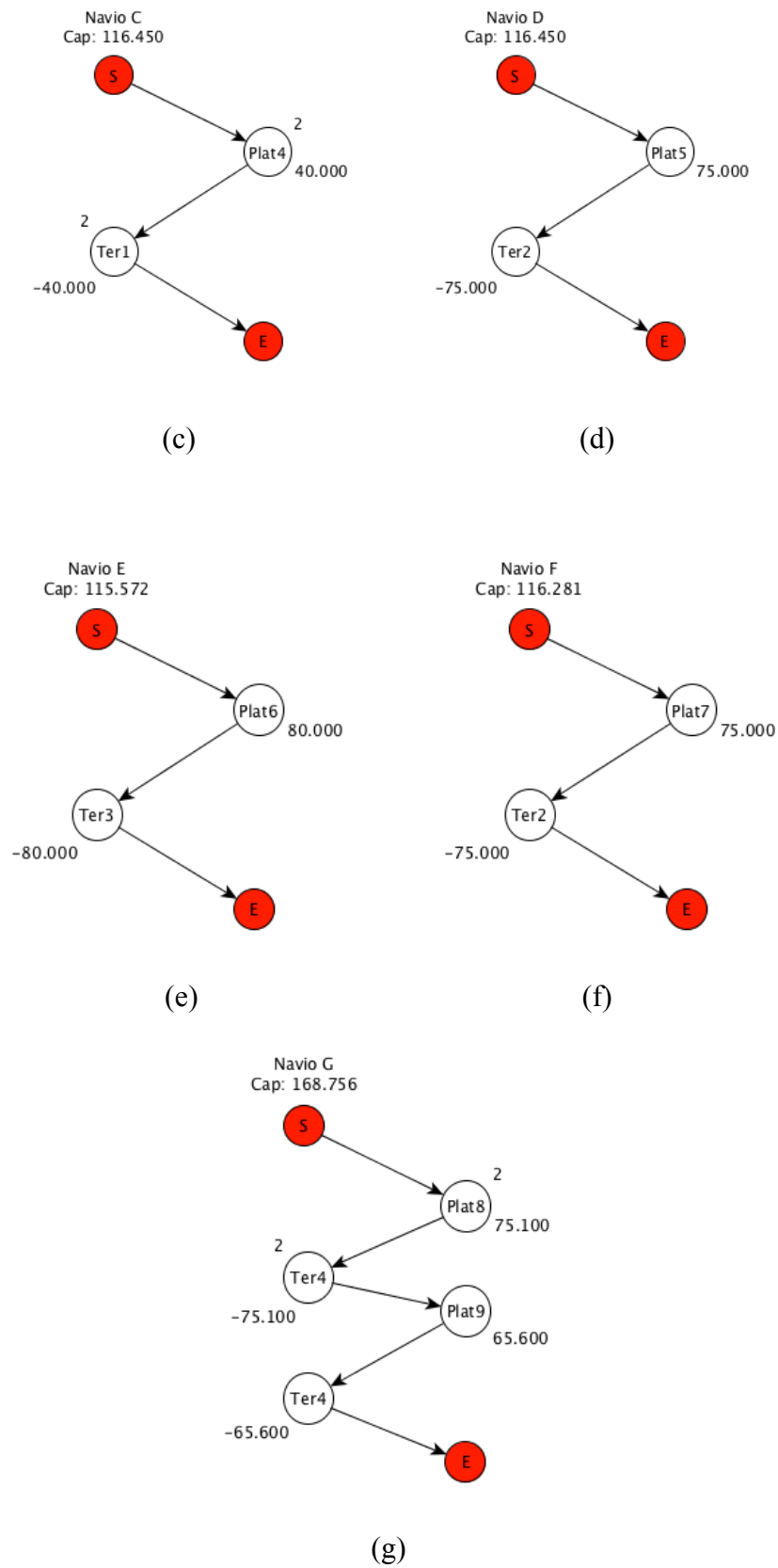


Figura 4.15 - Representação esquemática da solução do exemplar N16 com $|K|=10$, que utilizou 7 navios onde (a) representa a rota do navio A; (b) a rota do navio B; (c) a rota do navio C; (d) a rota do navio D; (e) a rota do navio E; (f) a rota do navio F; (g) a rota do navio G.

Com o intuito de verificar o quanto o conjunto de dados influencia na dificuldade em se obter uma solução, foi estabelecido um terceiro exemplar de testes com este conjunto de dados, para diferentes intervalos de tempo. A partir de um horizonte de 44 pares coleta/entrega, foram gerados quatro exemplares com 11 pares coleta/entrega para intervalos consecutivos de tempo. O quadro 4.5 apresenta os resultados destes exemplares, divididos por intervalos de tempo.

Quadro 4.5 – Resultados dos exemplares N11 para diferentes intervalos de tempo.

# Exemplar	K	Intervalo de tempo	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)
					Inteiras	Contínuas		
N11_CONJ2_K8_T1	8	1	5	15.734	11.552	12.161	34,45	36.000
N11_CONJ2_K11_T2	11	2	6	26.005	21.296	22.265	0	8.901
N11_CONJ2_K8_T3	8	3	5	15.734	11.552	12.161	0	79
N11_CONJ2_K11_T4	11	4	6	26.005	21.296	22.265	10,84	36.000

Nota-se que as características dos pares coleta/entrega também influenciam na complexidade do problema, assim como o número de navios disponíveis. Para $|K|=8$, o exemplar com intervalo de tempo 1 forneceu uma solução com *gap* de 34,45%, enquanto que o exemplar com intervalo de tempo 3 apresentou solução ótima em 79 segundos de processamento do *solver*. Já para $|K|=11$, o exemplar com intervalo de tempo 2 resultou em solução ótima depois de 8.901 segundos de processamento, enquanto que o exemplar com intervalo de tempo 4 encerrou o tempo de processamento máximo com *gap* de 10,84%. Então, destaca-se que mesmo para exemplares de tamanhos iguais, a configuração dos dados do problema pode torná-lo difícil de ser resolvido. Os principais fatores que impactam são: janelas de tempo apertadas, disponibilidade de navios, características de restrição de acesso aos terminais, dentre outros. Assim, uma investigação mais detalhada sobre a influência destas características é um dos alvos de análise para as próximas etapas deste trabalho.

4.2.3 Conjunto de dados 3

Um terceiro conjunto de dados foi fornecido pela empresa, contemplando períodos mais recentes de tempo, em comparação com os conjuntos anteriores. Este conjunto foi então utilizado para também testar o efeito da inserção de todas as fixações (3.30)-(3.59) descritas na seção 3.3.3. Além disso, os testes para este conjunto de dados incluem a FO dada por (3.64). O quadro 4.6 exhibe os resultados dos exemplares N16, N22 e N44 utilizando o conjunto de dados 3, sem a inclusão das fixações. Por sua vez, para fins de comparação de desempenho computacional, o quadro 4.7 apresenta os resultados considerando todas as

fixações descritas. Em todos os exemplares deste conjunto, $|K|=25$ e o valor de β utilizado foi de 1.000.

Quadro 4.6 – Resultados dos exemplares testados para o conjunto de dados 3, sem a inclusão das fixações.

# Exemplar	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)
			Inteiras	Contínuas		
N16_CONJ3	10	426.480	174.500	346.704	0	280
N22_CONJ3	13	589.362	220.900	446.504	45,95	18.000
N44_CONJ3	-	1.498.961	520.450	1.003.454	-	-

Quadro 4.7 - Resultados dos exemplares testados para o conjunto de dados 3, com a inclusão das fixações.

# Exemplar	# Navios Utilizados	# Restrições	# Variáveis		Gap (%)	Tempo (s)
			Inteiras	Contínuas		
N16_CONJ3_FX	10	426.480	13.982	345.854	0	57
N22_CONJ3_FX	13	589.362	14.482	446.504	0	5.280
N44_CONJ3_FX	-	1.498.961	116.893	1.003.454	-	-

Nota-se que o efeito das fixações esperado *a priori* confirmou-se com a expressiva melhoria de desempenho do modelo. Isto se deve ao fato de que, essencialmente, as fixações eliminam um volume muito grande de variáveis que não deveriam ser consideradas pelo modelo dentro do espaço de soluções. No caso N16, 91,98% das variáveis inteiras foram eliminadas; para o N22, o total de variáveis inteiras eliminadas foi de 93,44% e, por fim, para o N44, 77,54%.

Para ilustrar a curva de geração de solução do modelo, tomou-se como exemplo o N22_CONJ3_FX, que encontra-se ilustrado na figura 4.16.

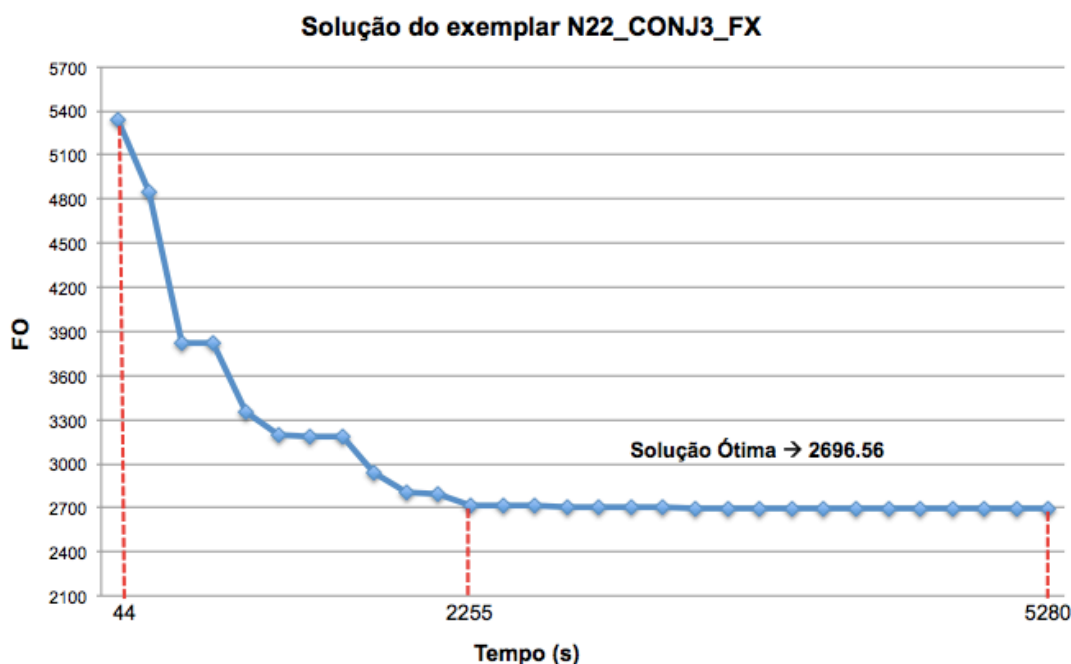


Figura 4.16 – Curva de solução do exemplar N22_CONJ3_FX.

Note que a primeira solução factível para o modelo é encontrada com 44 segundo. A solução ótima é obtida com 2.255 segundos de processamento, e provada somente após 3.025 segundos, totalizando os 5.280 segundos de processamento apresentados anteriormente.

4.2.4 Testes com parâmetros alternativos do solver

O CPLEX, *solver* utilizado para os experimentos deste trabalho, possui uma série de parâmetros que podem ser configurados de acordo com a natureza do problema em mãos para buscar melhores soluções, conforme mencionado na seção 2.4.2. Dessa forma, foram realizados alguns testes computacionais para explorar o efeito da alteração destes parâmetros na solução do modelo. Apenas para fins de utilização como *benchmark*, utilizou-se o exemplar N16_CONJ3, construído com uma FO dada por (3.64).

Foram testados os seguintes parâmetros: ênfase em otimalidade, ênfase em factibilidade, desligamento do pré-processamento do *solver*, habilitação das heurísticas do *solver*, *local branching* e RINS (estas duas últimas heurísticas estão também descritas na seção 2.4.2 deste trabalho). Os resultados não se mostraram promissores – em todos os casos, a alteração dos parâmetros produziu resultados inferiores, tanto em qualidade de solução quanto em tempo de processamento computacional.

Assim, a alteração de nenhum dos parâmetros obteve uma melhoria no resultado obtido pelo modelo em condições *default*, caracterizado pelo *benchmark* N16_CONJ3. Assim, optou-se por não mais explorar este tipo de teste com outros exemplares. Além disso, foi também testado o *solver* alternativo GUROBI, que também não apresentou resultados superiores ao CPLEX para o problema em mãos.

5 MÉTODOS HEURÍSTICOS DE SOLUÇÃO

Conforme descrito na seção 2.4.2, a *MIP-heuristic* conhecida como *relax-and-fix* é tradicionalmente empregada em problemas de programação da produção, em especial *lot sizing*, cujo critério de particionamento de variáveis tradicionalmente empregado é o tempo. Em geral, nesta classe de problemas o tempo é discreto e o particionamento passa a ser realizado por meio da manipulação das variáveis de interesse baseada diretamente nos índices de tempo. Além do trabalho já citado de Uggen, Fodstad e Nørstebø (2011), nenhum outro registro foi encontrado na literatura da aplicação desta heurística para problemas de roteirização. Mesmo no trabalho destes autores, o tempo considerado no modelo VRP é discretizado para melhor se adaptar ao funcionamento básico da heurística.

Esta característica motivou a aplicação de uma primeira estratégia de solução heurística, baseada na decomposição direta de um dos índices da variável, dando origem à estratégia I de solução. Posteriormente, uma estratégia mais elaborada de particionamento foi estudada, denominada estratégia II. Para os testes computacionais de ambas as estratégias, optou-se por utilizar apenas o conjunto de dados 3, pois é o que baseia-se nas informações mais recentes da empresa, e é o conjunto que contempla também todas as fixações de variáveis, FO mais atualizada e penalização de visitas consecutivas a plataformas.

5.1 Estratégia I

Nesta estratégia, adotou-se o particionamento das variáveis inteiras do problema (x_{ijk}) baseada no conjunto K de navios. Analogamente às aplicações tradicionais da *relax-and-fix*, este é também um particionamento direto do ponto de vista de facilidade de implementação e manipulação das variáveis do modelo. Para isso, o conjunto de variáveis x_{ijk} foi dividido em diferentes intervalos de k , de acordo com o conjunto de dados em mãos. A figura 5.1 ilustra o funcionamento desta estratégia de implementação da heurística.

De acordo com o funcionamento básico da *relax-and-fix*, apresentado de forma geral na seção 2.4.2, o conjunto K de navios é particionado em subconjuntos menores denominados “Intervalo 1”, “Intervalo 2” etc., cujo tamanho (“passo”) pode variar. Na primeira iteração, é imposta a integralidade para as variáveis, $x_{ijk}, k \in \text{Intervalo 1}$ enquanto que as variáveis dos demais intervalos tem a condição de integralidade relaxada. Resolve-se, então, o MIP resultante, de tamanho bem menor que o original. Posteriormente, na segunda iteração, as variáveis $x_{ijk}, k \in \text{Intervalo 1}$ são fixadas em seus valores inteiros obtidos na solução da primeira iteração e, por sua vez, é imposta a integralidade para as variáveis $x_{ijk}, k \in \text{Intervalo 2}$ e relaxada a condição de integralidade para os demais intervalos. Da mesma forma, resolve-se o MIP resultante e, assim, sucessivamente, os intervalos 3,4, ..., n vão sendo cobertos, até que todo o conjunto de índices k tenha sido coberto. Caso algum dos MIP resulte infactível, a heurística para, sem retornar uma solução factível para o problema original. A figura 5.1 apresenta uma ilustração do funcionamento da heurística *relax-and-fix* com particionamento de navios.

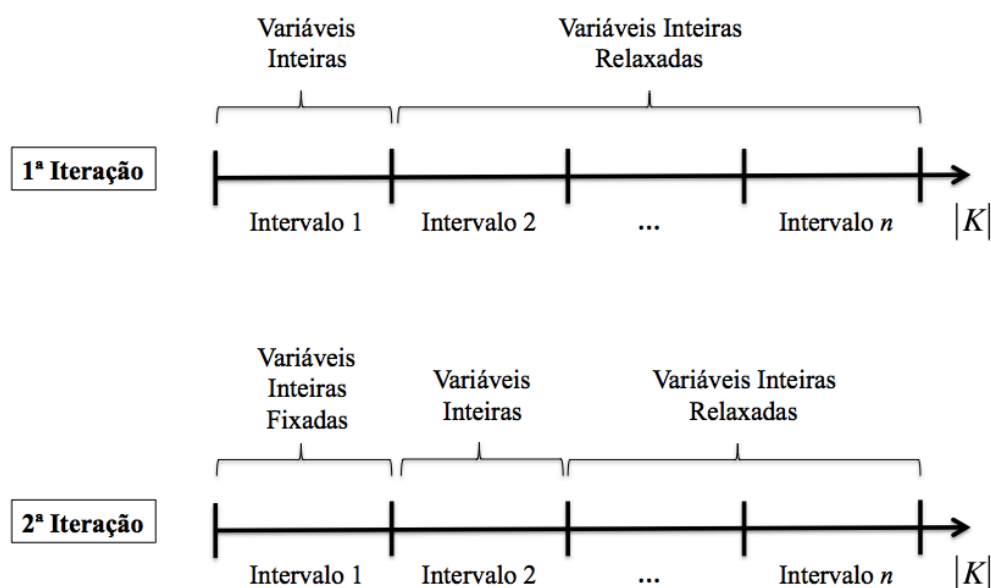


Figura 5.1 – Esquema ilustrativo do funcionamento da heurística *relax-and-fix* com duas iterações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma descrição em passos do algoritmo é dado por:

- Passo 1.** Selecionar o passo m^8 do algoritmo;
- Passo 2.** Selecionar os m próximos navios, que ainda não foram alocados;
- Passo 3.** Impor a integralidade dos navios referentes ao passo 2;
- Passo 4.** Relaxar a integralidade dos navios ainda não selecionados no passo 2;
- Passo 5.** Resolver o MIP resultante;
- Passo 6.** Fixar os valores x_{ijk} inteiros resultantes da solução do MIP do passo 5;
- Passo 7.** Repetir os passos 2-6 até que não haja navios remanescentes.

5.1.1 Resultados computacionais e ajustes na heurística

Para os testes iniciais da estratégia I, utilizou-se um conjunto de dados *toy* com 6 navios, 3 plataformas e 3 terminais baseado nos mesmos *toys* utilizados no capítulo 4, com o intuito de testar a sistemática da heurística manual e automaticamente e, posteriormente, implementar a versão para exemplares de tamanho realista.

Algumas observações da implementação são:

- Quando definem-se 5 dos 6 navios com capacidades semelhantes, ao rodar a heurística, o modelo utiliza apenas os 2 últimos navios na solução e despacha os primeiros para o depósito final;

- Quando colocam-se apenas 2 navios que podem efetivamente operar as coletas e entregas (com capacidade compatível) nas duas últimas posições ($k=5$ e $k=6$), a heurística é capaz de encontrar a solução ótima, pois os primeiros navios são despachados diretamente para os depósitos finais e, portanto, os últimos navios são capazes de cumprir a demanda;

⁸ O valor m é designado como o passo da heurística, ou seja, é o número de navios que serão selecionados em cada uma das iterações.

- Quando colocam-se apenas 2 navios que podem efetivamente operar as coletas e entregas (com capacidade compatível) nas primeiras posições ($k=1$ e $k=2$), a heurística não é capaz de encontrar solução factível, pois, da mesma forma, os primeiros navios são despachados diretamente para o depósito final e não há mais navios compatíveis para realizar as coletas e entregas programadas.

Como um dos principais componentes de custo da FO é associado ao consumo dos navios de acordo com sua utilização, esta versão da *relax-and-fix* particionada em navios despacha os navios para os depósitos finais até que o problema se torna infactível, pois os navios restantes não são capazes de realizar as coletas e entregas. Assim, a ordenação dos navios com base em sua capacidade e demanda a ser atendida pode trazer resultados diferentes para o modelo. Isso se deve principalmente ao fato de que o particionamento por navios deixa a heurística extremamente "míope" com relação ao horizonte de demanda do problema em mãos. Ressalta-se que mesmo com a utilização *overlapping*⁹ na heurística, o comportamento descrito acima perdurou.

A partir destas observações decorrentes dos testes com os *toy models* e os resultados apresentados, foi realizado um ajuste na heurística *relax-and-fix* para que os arcos que ligassem os depósitos iniciais e finais dos navios não fossem fixados em cada iteração, de tal forma que se a heurística decide por não utilizar um determinado navio em uma iteração, ela não o envia diretamente para o depósito. Isto faz com que os navios fiquem disponíveis para serem utilizados ao longo das iterações e as variáveis que conectam os pontos operacionais aos depósitos finais são fixados somente na última iteração da heurística, quando todos os pedidos já foram alocados nos navios selecionados e já é possível encerrar a rota de todos os navios.

Assim, uma descrição em passos do algoritmo ajustado é dada por:

Passo 1. Selecionar o passo m do algoritmo;

Passo 2. Selecionar os m próximos navios, que ainda não foram alocados;

Passo 3. Impor a integralidade dos navios referentes ao passo 2;

Passo 4. Relaxar a integralidade dos navios ainda não selecionados no passo 2;

⁹ Técnica empregada nas heurísticas *relax-and-fix* no qual uma seleção de variáveis fixadas em seus valores inteiros em uma determinada iteração são desafixadas e para poder assumir outro valor inteiro. Em outras palavras, é uma possibilidade que o modelo tem de "revogar" alguma decisão anterior com base nas novas condições da iteração atual.

Passo 5. Resolver o MIP resultante;

Passo 6. Identificar as variáveis x_{ijk} com $i \in S, j \in E$;

Passo 7. Impor a integralidade das variáveis identificadas no passo 6;

Passo 8. Fixar os variáveis x_{ijk} inteiras resultantes da solução do MIP do passo 5, exceto as variáveis identificadas no passo 6;

Passo 9. Repetir os passos 2-8 até que não haja navios remanescentes.

O código em GAMS da implementação da estratégia I ajustada encontra-se no Apêndice C deste trabalho.

O primeiro critério utilizado para ordenar a lista de navios foi totalmente arbitrário, ou seja, utilizar a própria sequência alfabética dos nomes dos navios, que é fornecida diretamente pelo sistema da empresa. Assim, neste primeiro conjunto de testes com a estratégia I da heurística não foi utilizada nenhum tipo de ordenação da lista. Os *gaps* de optimalidade foram calculados com base nos testes N16_CONJ3_FX e N22_CONJ3_FX, que forneceram solução ótima para os respectivos conjuntos de dados e foram apresentados no capítulo 4. O quadro 5.1 apresenta os resultados obtidos com os testes para os exemplares N16, N22 e N44 do conjunto de dados 3.

Quadro 5.1 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística *relax-and-fix*, utilizando a ordenação alfabética de navios (i.e, sem ordenação).

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFI_M2	11	16,90	113
N16_CONJ3_RFI_M3	11	2,70	75
N16_CONJ3_RFI_M5	11	11,59	47
N16_CONJ3_RFI_M7	11	0,08	34
N16_CONJ3_RFI_M10	13	11,59	28
N22_CONJ3_RFI_M2	13	33,85	180
N22_CONJ3_RFI_M3	13	18,49	125
N22_CONJ3_RFI_M5	13	26,72	85
N22_CONJ3_RFI_M7	13	18,04	62
N22_CONJ3_RFI_M10	13	26,72	63
N44_CONJ3_RFI_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_M3	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_M5	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_M7	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_M10	-	-	-

Uma segunda rodada de testes envolveu a ordenação dos navios com base em seus custos, do menor para o maior. Para tal, foi calculada a diferença entre o consumo de combustível em movimento e o consumo de combustível em *stand-by*, dada por $Cm_k - Cs_k$. Esta diferença fornece o custo efetivo do navio durante o seu deslocamento em operações de coleta e entrega. Assim, os navios foram ordenados em ordem crescente de custo. O quadro 5.2 apresenta os resultados obtidos com os testes.

Quadro 5.2 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística *relax-and-fix*, utilizando a ordenação crescente por consumo (custo) do navio.

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFI_CONS_M2	10	14,13	119
N16_CONJ3_RFI_CONS_M3	10	14,13	85
N16_CONJ3_RFI_CONS_M5	10	14,13	58
N16_CONJ3_RFI_CONS_M7	10	14,13	49
N16_CONJ3_RFI_CONS_M10	10	0,00	37
N22_CONJ3_RFI_CONS_M2	13	14,94	191
N22_CONJ3_RFI_CONS_M3	13	15,12	134
N22_CONJ3_RFI_CONS_M5	13	2,03	95
N22_CONJ3_RFI_CONS_M7	13	2,03	82
N22_CONJ3_RFI_CONS_M10	13	1,44	122
N44_CONJ3_RFI_CONS_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONS_M3	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONS_M5	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONS_M7	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONS_M10	-	-	-

A terceira rodada de experimentos utilizou a ordenação dos navios agora com base em sua capacidade, da menor para a maior. Os navios foram organizados em ordem crescente do seu parâmetro Cap_k . O quadro 5.3 apresenta os resultados obtidos com os testes.

Quadro 5.3 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística *relax-and-fix*, utilizando a ordenação crescente por capacidade do navio.

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFI_CAP_M2	11	14,13	58
N16_CONJ3_RFI_CAP_M3	11	3,39	90
N16_CONJ3_RFI_CAP_M5	11	14,13	58
N16_CONJ3_RFI_CAP_M7	11	3,39	54
N16_CONJ3_RFI_CAP_M10	11	11,59	48
N22_CONJ3_RFI_CAP_M2	13	7,93	199
N22_CONJ3_RFI_CAP_M3	13	5,57	72
N22_CONJ3_RFI_CAP_M5	13	1,49	97
N22_CONJ3_RFI_CAP_M7	13	1,49	77
N22_CONJ3_RFI_CAP_M10	13	1,46	95
N44_CONJ3_RFI_CAP_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAP_M3	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAP_M5	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAP_M7	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAP_M10	-	-	-

Uma quarta rodada de experimentos foi também realizada utilizando a capacidade como critério, porém em ordem decrescente (do maior para o menor). O quadro 5.4 apresenta os resultados obtidos com estes testes.

Quadro 5.4 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística *relax-and-fix*, utilizando a ordenação decrescente por capacidade do navio.

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M2	11	14,21	154
N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M3	11	0,28	91
N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M5	11	14,41	61
N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M7	11	0,00	52
N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M10	11	0,00	39
N22_CONJ3_RFI_CAPDEC_M2		Infactível	
N22_CONJ3_RFI_CAPDEC_M3		Infactível	
N22_CONJ3_RFI_CAPDEC_M5		Infactível	
N22_CONJ3_RFI_CAPDEC_M7		Infactível	
N22_CONJ3_RFI_CAPDEC_M10		Infactível	
N44_CONJ3_RFI_CAPDEC_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAPDEC_M3	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAPDEC_M5	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAPDEC_M7	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CAPDEC_M10	-	-	-

Note que para este tipo de ordenação, ao contrário do que se esperava, a heurística *relax-and-fix* não foi capaz de fornecer soluções factíveis para os exemplares N22. Em contrapartida, dois exemplares do N16 forneceram soluções ótimas com poucos segundos de processamento.

Por fim, uma quinta rodada de experimentos ordenou os navios com base na razão $(Cm_k - Cs_k) / Cap_k$, do menor valor para o maior valor desta razão, que fornece o custo efetivo do navio em operações de coleta e entrega por unidade de volume que ele pode transportar. O quadro 5.5 apresenta os resultados obtidos com os testes.

Quadro 5.5 - Resultados computacionais da estratégia I da heurística *relax-and-fix*, utilizando a ordenação crescente da razão entre consumo e capacidade do navio.

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFI_CONSCAP_M2	10	14,21	133
N16_CONJ3_RFI_CONSCAP_M3	10	14,21	99
N16_CONJ3_RFI_CONSCAP_M5	12	14,21	58
N16_CONJ3_RFI_CONSCAP_M7	11	14,13	50
N16_CONJ3_RFI_CONSCAP_M10	11	14,13	39
N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M2	13	3,17	206
N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M3	13	2,47	147
N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M5	13	2,14	99
N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M7	13	2,47	95
N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M10	13	1,44	93
N44_CONJ3_RFI_CONSCAP_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONSCAP_M3	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONSCAP_M5	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONSCAP_M7	-	-	-
N44_CONJ3_RFI_CONSCAP_M10	-	-	-

De uma forma geral, é possível afirmar que os exemplares com m maior tendem a apresentar melhor desempenho computacional, tanto do ponto de vista de *gap* quanto de tempo de processamento. A estratégia I da heurística *relax-and-fix* trouxe uma significativa vantagem em processamento computacional para modelo proposto. Para os exemplares N16, resolver o modelo sem a heurística com o GAMS/CPLEX dado por N16_CONJ3_FX ainda é competitivo pois foi capaz de gerar uma solução ótima em apenas 22 segundos. Por outro lado, a estratégia I apresenta resultado ótimo ou próximo ao ótimo, como é o caso dos exemplares N16_CONJ3_RFI_CONS_M10, N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M7 e N16_CONJ3_RFI_CAPDEC_M10 (*gap* de 0%) e N16_CONJ3_RFI_M7 (*gap* de 0,08%), em 37, 52, 39 e 34 segundos respectivamente. Já para os exemplares N22, o ganho computacional da heurística sobre o modelo é evidente, uma vez que o exemplar N22_CONJ3_FX foi resolvido otimamente em 5.280 segundos pelo GAMS/CPLEX e as heurísticas geraram resultados com *gaps* de otimalidade próximos a 1% - 3% em poucas dezenas de segundos.

O melhor resultado para o exemplar N16 foi atingido utilizando-se a ordenação crescente de custos do navio, com m definido em 10, e ordenação decrescente de capacidade, com m definido em 7 e 10. Estes testes apresentaram a solução ótima em poucos segundos de processamento. Já o exemplar N22 apresentou os melhores resultados tanto com a ordenação crescente de custos com passo 10 (N22_CONJ3_RFI_CONS_M10), quanto com ordenação crescente da razão entre custo e capacidade com passo 10 (N22_CONJ3_RFI_CONSCAP_M10). Ambos os testes apresentaram um *gap* de 1,44% e foram processados em 122 e 93 segundos, respectivamente.

A ordenação que apresentou o melhor resultado para os exemplares N16 foi curiosamente a alfabética, que produziu uma média de *gaps* menor e um tempo computacional similar aos demais esquemas de ordenação. Já para os exemplares N22, a ordenação pela razão entre consumo e capacidade gerou a menor média de *gaps* de otimalidade. Com relação ao número de navios utilizados da frota, é possível notar que eles se mantiveram dentro do mesmo intervalo, não havendo nenhum destaque para nenhum dos testes realizados. Dessa forma, é possível afirmar que a heurística, mesmo incorporando uma certa inteligência na seleção dos navios, não é capaz de consolidar os pedidos nos navios. As soluções apresentadas pelas heurística diferenciam-se simplesmente pela troca de 1, 2 ou 3 navios entre um conjunto de navios disponíveis. Convém também notar que a heurística *relax-and-fix* não foi capaz de encontrar soluções factíveis para os exemplares N44, considerados difíceis.

5.2 Estratégia II

A segunda estratégia adotada para aplicar a heurística *relax-and-fix* é baseada na divisão temporal do problema, bem explorada nas implementações tradicionais deste algoritmo em outros problemas da literatura. Como o modelo em mãos trata o tempo de forma contínua, sua marcação pode ser feita por meio das janelas de tempo $[a_i, b_i]$, que estão dispostas ao longo do horizonte de planejamento e associadas a cada um dos pedidos a serem coletados e entregues (pares coleta/entrega).

Inicialmente os pedidos são ordenados de acordo com a abertura da janela de tempo da coleta (a_i). Selecionam-se, então, as m primeiras coletas, com início mais cedo. Como a estas coletas estão associadas também as respectivas entregas, o algoritmo impõe a integralidade dos arcos referentes a estes pares coleta/entrega e relaxa a integralidade dos

demais pedidos, que ainda não foram selecionados e estão na lista ordenada. Resolve-se, então, o MIP resultante de menor tamanho e identificam-se os arcos diretos (com valor inteiro) entre os nós já selecionados e os fixa, exceto aqueles arcos que conectam os depósitos iniciais e finais dos navios. Caso não haja arcos inteiros, o problema decomposto é infactível e o algoritmo para. Este procedimento é repetido até que não existam mais pedidos na lista ordenada por janela de tempo a serem alocados aos navios. Note que, assim como ocorre com a estratégia I da heurística *relax-and-fix*, é crucial não fixar as variáveis que ligam os depósitos iniciais e finais do navio ao longo das iterações do algoritmo para que a heurística seja capaz de inserir nós ao longo da rota até a última iteração, na qual os arcos dos depósitos iniciais e finais são finalmente fixados.

Uma descrição em passos do algoritmo é dado por:

- Passo 1.** Ordenar as coletas em ordem crescente de a_i ;
- Passo 2.** Selecionar as m coletas com início mais cedo, que ainda não foram alocadas;
- Passo 3.** Impor a integralidade dos pares coleta-entrega referentes ao passo 2;
- Passo 4.** Relaxar a integralidade dos pares coleta-entrega ainda não selecionados no passo 2;
- Passo 5.** Resolver o MIP resultante;
- Passo 6.** Identificar as variáveis x_{ijk} com valores inteiros (arcos diretos) que ligam os pares coleta-entrega selecionados;
- Passo 7.** Identificar as variáveis x_{ijk} com $i \in S, j \in E$;
- Passo 8.** Impor a integralidade das variáveis identificadas no passo 7;
- Passo 9.** Fixar as variáveis x_{ijk} inteiras resultantes da solução do MIP identificadas no passo 6, exceto as variáveis identificadas no passo 7;
- Passo 10.** Fixar os arcos do passo 6. Caso não haja arcos diretos, parar;
- Passo 11.** Repetir os passos 2-10 até que não haja arcos remanescentes na lista ordenada.

O pseudocódigo e o código GAMS para a estratégia II pode ser encontrado no Apêndice D e E deste trabalho, respectivamente.

5.2.1 Resultados computacionais

Para os testes com as heurísticas *relax-and-fix* também foram utilizados os exemplares N16, N22 e N44 do conjunto de dados 3. Para cada um deles, foram definidos valores de passo (m) múltiplos da quantidade de pedidos total (n) para que todas as iterações trabalhassem com o mesmo número de pedidos. Os *gaps* de otimalidade também foram calculados com base nos testes N16_CONJ3_FX e N22_CONJ3_FX, que forneceram solução ótima para os respectivos conjuntos de dados e foram apresentados no capítulo 4. Note que nesta estratégia a partição representada pelo passo m refere-se agora ao número de pedidos de coleta e entrega existentes no exemplar. Por este motivo, não foram utilizadas as mesmas partições da estratégia I. O quadro 5.6 sumariza os resultados obtidos com os testes da heurística.

Quadro 5.6 – Resultados computacionais da estratégia II da heurística *relax-and-fix*

# Exemplar	# Navios Utilizados	Gap (%)	Tempo (s)
N16_CONJ3_RFII_M2	11	16,77	99
N16_CONJ3_RFII_M4	11	16,77	56
N16_CONJ3_RFII_M8	12	14,36	24
N22_CONJ3_RFII_M2	14	11,16	646
N22_CONJ3_RFII_M11	13	1,45	200
N44_CONJ3_RFII_M2	-	-	-
N44_CONJ3_RFII_M4	-	-	-
N44_CONJ3_RFII_M11	-	-	-
N44_CONJ3_RFII_M22	-	-	-

Para os exemplares N16 e N22, foi estabelecido um limite de tempo de processamento de 10 minutos (600 segundos) para cada iteração da heurística. Para os exemplares N16 foram encontradas soluções factíveis na última iteração em um curto tempo computacional, porém acima do apresentado pelo modelo matemático N16_CONJ3_FX e com um *gap* de otimalidade. Já os exemplares N22 apresentaram um tempo de processamento computacional inferior ao modelo N22_CONJ3_FX, porém superior aos apresentados pela estratégia I. Além disso, os *gaps* de otimalidade se mantiveram em um intervalo similar para as duas estratégias. Um ponto importante a se destacar é que a cada uma das iterações promovidas pela heurística, o pacote GAMS inicia um pré-processamento para cada uma delas, contabilizando cerca de 2 a 10 segundos para cada uma das iterações, dependendo do tamanho do problema, que não são dedicados ao processamento computacional propriamente dito.

Considerando os testes realizados, é possível notar, assim como na estratégia I, que os exemplares com m maior, em geral, apresentam desempenho melhor, tanto do ponto de vista de *gap* quanto de tempo de processamento. Isto indica que para a implementação da *relax-and-fix*, é preferível que se utilize passos maiores para minimizar o tempo de reprocessamento, bem como evitar que o problema busque muitas soluções locais ótimas baseada em um número pequeno de pedidos. Em outras palavras, a propensão à infactibilidade é maior para exemplares em que o m é menor e a heurística busca soluções com poucas variáveis integralizadas.

Assim como na estratégia I, para o exemplar N44, não foram encontradas soluções factíveis para nenhum tamanho de particionamento do problema com a estratégia II. Por tratar-se de um problema muito grande e apertado do ponto de vista de janelas de tempo, conseguir uma solução factível é difícil. Para este exemplar foram também testados limites de tempo de 10, 30, 60 e 90 minutos para cada iteração, mas nenhum destes testes resultou em solução factível.

Com o intuito de testar a convergência para a solução ótima da solução heurística dada pela estratégia II da *relax-and-fix*, as soluções com menores *gaps* dos exemplares N16 e N22, respectivamente N16_CONJ3_RFII_M8 (14,36% de *gap*) e N22_CONJ3_RFII_M11 (1,45% de *gap*), foram inseridas como solução inicial nos exemplares N16_CONJ3_FX e N22_CONJ3_FX e rodadas visando à otimalidade. O exemplar N16 com solução heurística inicial levou 70 segundos para encontrar e provar a solução ótima, em comparação com os 57 segundos. Já o exemplar N22 encontrou e provou solução ótima em apenas 22 segundos, comparativamente aos 5.280 segundos¹⁰ necessários para rodar o modelo sem a heurística. Para ambos os casos, vide quadro 4.7. Este resultado indica que uma boa prática para a operação real é, inicialmente, rodar a heurística e em seguida inserir sua solução como ponto de partida para o modelo.

¹⁰ Ver figura 4.16 da seção 4.2.3.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe uma abordagem de otimização para o problema de roteirização e programação de navios do tipo coleta e entrega com janelas de tempo, baseada em um modelo matemático e em heurísticas *relax-and-fix*. O modelo proposto captura uma série de importantes características do problema, tais como heterogeneidade da frota de navios, regras de atracação de navios para diferentes tipos de plataformas e terminais, consumo de combustível dos navios e restrições de incompatibilidade de mistura de produtos em um navio.

O paradigma origem-destino adotado consiste em uma das formas de representar o modelo de tomada de decisões na empresa estudada, na qual os lotes são pré-estabelecidos de acordo com a refinaria específica de destino e suas necessidades. Por tratar-se de um problema de difícil solução (NP-difícil), em que encontrar uma solução factível na presença de janelas de tempo já é por si só um problema difícil, os exemplares resolvidos otimamente pelo GAMS/CPLEX limitarem-se a tamanhos que contém poucas dezenas de pedidos, o que representa cerca de uma semana de operação na empresa estudada.

Para o conjunto de dados 1, que contempla basicamente as restrições clássicas de um PDPTW, o modelo proposto foi capaz de encontrar soluções que contemplam 36 pedidos, com *gap* de 23,50% em 5 horas de processamento computacional. Para os conjuntos de dados 2 e 3, que incluem as restrições adicionais baseadas em regras de negócio, apresentadas nas seções 3.3.1 e 3.3.2, e os custos de atracação na FO, o modelo foi capaz de encontrar solução factível para exemplares menores, da ordem de 22 pedidos, uma vez que o problema se tornou mais difícil.

A abordagem baseada em heurísticas de programação matemática (*MIP-heuristics*) trouxe bons resultados para alguns exemplares, apesar de não ter encontrado solução factível para os exemplares maiores, por exemplo, N44. Estas heurísticas foram capazes de reduzir intensamente o tempo computacional necessário para resolver otimamente um exemplar N22, de mais de 5.280 segundos para 37 segundos, o que evidencia o potencial do seus usos em problemas reais com poucas dezenas de pares coleta-entrega. A estratégia I da heurística *relax-and-fix*, baseada no particionamento de navios, apresentou resultados

superiores às atingidas pela estratégia II, que baseia-se nos pedidos a serem coletados e entregues. Porém, é necessário enfatizar que a estratégia baseada em pedidos ainda merece mais esforço em pesquisa e deve passar por etapas de refinamento de sua lógica.

Por ser um dos primeiros trabalhos a aplicar heurísticas *relax-and-fix* ao problema de roteirização com tempo contínuo, existem muitas oportunidades de melhoria ainda a serem exploradas. A implementação da heurística *relax-and-fix* com base na ordenação de pedidos no tempo (estratégia II) representa um avanço para as aplicações desta heurística e também fornece as bases para futuras implementações que não utilizem o particionamento clássico do índice tempo das variáveis de decisão. Outras regras de negócio podem ser aplicadas com base nestes primeiros experimentos de implementação fora dos “domínios tradicionais” desta heurística.

Um ponto importante de discussão é sobre os pontos específicos do problema que apresentam infactibilidade. Em geral, esta é uma maneira interessante de descobrir se o problema é mais “apertado” do ponto de vista das disponibilidades de capacidades e recursos envolvidos e, com isso, projetar estratégias de penalização de certas métricas, visando a obtenção de soluções factíveis aderentes à operação real, e que possam ser obtidas em curtos espaços de tempo. Dessa forma, como pesquisa futura, podem ser explorados e propostos as seguintes linhas de trabalho:

- Modificação do modelo para considerar as restrições de berços nos terminais;
- Refinamento da heurística *relax-and-fix*, utilizando novos critérios de seleção de pedidos e particionamento;
- Implementação de estratégias *backward* para a estratégia II;
- Implementação de estratégias de *overlapping* para a estratégia II;
- Desenvolvimento de uma estratégia híbrida entre as estratégias I e II, que considere a partição dos pedidos e dos navios simultaneamente;
- Implementação da *relax-and-fix* em diferentes pacotes computacionais¹¹, bem como utilizando diferentes arquiteturas de informação, tais como implementação pura em linguagem de programação (C/C++, Python etc.) em conexão direta com os *solvers* comerciais (CPLEX e Gurobi) e a utilização de linguagens alternativas como, por exemplo, OPL;

¹¹ A aposta neste sentido visa a reduzir o tempo de compilação a cada rodada do modelo, na presença das heurísticas *relax-and-fix*. Pode-se, também, explorar o controle mais preciso dos métodos de solução a serem implementados pelo *solver*, bem como as operações de relaxação e integralização de variáveis.

- Aplicação das heurísticas a problemas de roteirização similares com discretização do tempo;
- Implementação de heurísticas de melhoria acopladas à *relax-and-fix*, como as heurísticas *fix-and-optimize*, uma vez obtidos melhores resultados com as heurísticas de construção.

Por fim, é possível também trabalhar em alternativas de abordagem ao problema como, por exemplo, alterar o paradigma do modelo para um mais geral do tipo *oferta-demanda*, em que as quantidades a serem carregadas pelos navios passam a ser uma variável de decisão. Além disso, existem também perspectivas de integração dos problemas de roteirização com os de programação das refinarias, o que confere um aspecto mais geral de planejamento e programação da cadeia de suprimento para o problema e também aborda diferentes níveis de decisão dentro da companhia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, R.K; MAGNANTI, T.B.; ORLIN, J.B. **Network Flows: Theory, Algorithms and Applications**. Prentice-Hall: New Jersey, 1993.

AHUJA, R.K; MAGNANTI, T.L; ORLIN, J.B; REDDY, M.R. Applications of Network Optimization. In: BALL, M.O.; MAGNANTI, T.L.; MONNA, C.L.; NEMHAUSER, G.L. **Network Models**. Handbooks in Operations Research and Management Science, vol.7, North-Holland, 1995.

AL-KHAYYAL, F.; HWANG, S.J. Inventory constrained maritime routing and scheduling for multi-commodity liquid bulk, Part I: Applications and model. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 1, p. 106-130, 2007.

ANDERSSON, H.; HOFF, A.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LØKKETANGEN, A. Industrial aspects and literature survey: Combined inventory management and routing. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 9, p. 1515-1536, 2010.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Superintendência de Planejamento e Pesquisa. **Produção Nacional de Petróleo e LGN (Barris)**: planilha eletrônica. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?id=358>. Acesso em 15/06/2012.

APPELGREN, L. H. Column Generation Algorithm for a Ship Scheduling Problem. **Transportation Science**, v. 3, n. 1, p. 53-68, 1969.

APPELGREN, L. H. Integer Programming Methods for a Vessel Scheduling Problem. **Transportation Science**, v. 5, n. 1, p. 64-78, 1971.

ARENALES, M; ARMENTANO, V; MORABITO, R; YANASSE,H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.

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 Ser. A**, n.115, p.351–385, 2008.

BALDACCI, R.; HADJICONSTANTINO, E.; MINGOZZI, A. An exact algorithm for the Traveling Salesman Problem with Deliveries and Collections. **Networks**, v. 42, n. 1, p. 26-41, 21, 2003.

BALL, M. O. Heuristics based on mathematical programming. **Surveys in Operations Research and Management Science**, v. 16, n. 1, p. 21-38, 2011.

BELFIORE, P.; YOSHIZAKI, H. T. Y. Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 750-758, 2009.

BELLMORE, M.; BENNINGTON, G.; LUBORE, S. A maximum utility solution to a vehicle constrained tanker scheduling problem. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 15, n. 3, p. 403-411, 1968.

BELLMORE, M.; BENNINGTON, G.; LUBORE, S. A Multivehicle Tanker Scheduling Problem. **Transportation Science**, v. 5, n. 1, p. 36-47, 1971.

BERBEGLIA, G.; CORDEAU, J.F.; GRIBKOVSKAIA, I.; LAPORTE, G. Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. **TOP**, v. 15, n. 1, p. 1-31, 2007.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n.2, p.241-264, 2002.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J. Modelling and Simulation. In: Karlson, C. **Researching Operations Management**. NY, Routledge, 2009. pp. 265-306.

BERTSEKAS, D. **Network optimization: continuous and discrete models**. Athena Scientific: Massachusetts, 1998.

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. O. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews. **Computers & Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.

BRISKIN, L. Selecting Delivery Dates in the Tanker Scheduling Problem. **Management Science**, v. 12, n. 6, p. 224-235, 1966.

BRØNMO, G.; NYGREEN, B.; LYSGAARD, J. Column generation approaches to ship scheduling with flexible cargo sizes. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 139-150, 2010.

BROWN, G. G.; GRAVES, G. W.; RONEN, D. Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil. **Management Science**, v. 33, n. 3, p. 335-346, 1987.

CHALMERS, A.F. **O que é ciência, afinal?**. São Paulo: Editora Brasiliense, 1995.

CHRISTIANSEN, M. Decomposition of a Combined Inventory and Time Constrained Ship Routing Problem. **Transportation Science**, v. 33, n. 1, p. 3-16, 1999.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; RONEN, D. Ship routing and scheduling: status and perspectives. **Transportation Science**, vol.38, n.1, p.1-18, 2004.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Maritime transportation. In: BARNHART, C.; LAPORTE, G. **Handbook in Operations Research and Management Sciences**, vol.14, p.189-284, 2007.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Ship routing and scheduling in the new millennium. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n. 3, p. 467-483, 2013.

CHRISTOFIDES, N. Vehicle routing. In: LAWLER, E.L; LENSTRA,J.K; RINNOOY KAN,A.H.G; SHMOYS, D.B. **The Traveling Salesman Problem - A Guided Tour of Combinatorial Optimization**. Wiley, Chichester, 431-448, 1985.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. **Operations Research**, vol. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

CORDEAU, J.-F.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.-Y.; SEMET, F. A guide to vehicle routing heuristics. **Journal of the Operational Research Society**, v. 53, n. 5, p. 512-522, 2002.

CORDEAU, J.; LAPORTE, G.; SAVELSBERGH, M. W. P.; VIGO, D. Vehicle Routing. In: BARNHART, C.; LAPORTE, G. **Transportation**. Handbooks in OR&MS, North-Holland, v.14, 367-428, 2007a.

CORDEAU, J.; LAPORTE, G.; POTVIN, J.; SAVELSBERGH, M. W. P. Transportation on Demand. In: BARNHART, C.; LAPORTE, G. (Eds.). **Transportation**. Handbooks in OR&MS. North-Holland, v.14, 429-466, 2007b.

CUNHA, C.B.; GUALDA, N.D.F. Heuristics based on Lagrangian Relaxation for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. FOURTH INTERNATIONAL MEETING FOR RESEARCH IN LOGISTICS. **Anais...** Lisboa, v.1, p.192-203, 2002.

DANNA, E.; ROTHBERG, E.; PAPE, C. LE. Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions. **Mathematical Programming**, v. 102, n. 1, p. 71-90, 2004.

DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R. Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 1, p. 217-222, 1954.

DANTZIG, G.B.; FULKERSON, D.R.; JOHNSON, S.M. Solution of a large scale traveling-salesman problem. **Operations Research**, n.2, p. 393-410, 1954.

DANTZIG, G.B.; RAMSER, J.H. The truck dispatching problem. **Management Science**. vol.6, p-80-91, 1959.

DAVOGLIO, G.R.; TIRABOSCHI, I.G; MARTINI, M.C.; GONZAGA, M.C. **Processos Químicos da Indústria do Petróleo**. Relatório Técnico. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2011.

DESROCHERS, M.; LENSTRA, J. K.; SAVELSBERGH, M. W. P. A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 46, p. 322-332, 1990.

DESROSIERS, J.; DUMAS, Y.; SOLOMON, M.; SOUMIS, F. Time Constrained Routing and Scheduling. In: BALL, M.O.; MAGNANTI, T.L.; MONNA, C.L.; NEMHAUSER, G.L. **Network Routing**. Handbooks in Operations Research and Management Science, vol.8, North-Holland, 1995.

DILLENBERGER, C.; ESCUDERO, L. F.; WOLLENSAK, A.; ZHANG, W. On practical resource allocation for production planning and scheduling with period overlapping setups. **European Journal of Operational Research**, v. 75, n. 2, p. 275-286, 1994.

DIZ, G. S. S. **Proposta de um sistema de suporte à decisão para programação de navios baseado em otimização**: um caso prático. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia Industrial - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), 2012.

DROR, M.; LAPORTE, G.; TRUDEAU, P. Vehicle routing with split deliveries. **Discrete Applied Mathematics**, v. 50, p. 239-254, 1994.

DUMAS, Y.; DESROSIERS, J.; SOUMIS, F. The pickup and delivery problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 54, p. 7-22, 1991.

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.

FISCHETTI, M.; LODI, A. Local Branching. **Mathematical Programming Series B**, v. 98, n. 1, p. 23-47, 2002.

FLOOD, M. M. Application of Transportation Theory to Scheduling a Military Tanker Fleet. **Journal of the Operations Research Society of America**, v. 2, n. 2, p. 150-162, 1954.

FODSTAD, M.; UGGEN, K. T.; LIUM, A.; STREMERSCHE, G. LNG SCHEDULER : A rich model for coordinating vessel routing , inventories and trade in the liquefied natural gas supply chain. **The Journal of Energy Markets**, v. 3, n. 4, 2010.

FUKASAWA, R.; LYSGAARD, J.; ARAGÃO, M. P.; REIS, M.; UCHOA, E.; WERNECK, R. Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem. **Mathematical Programming Ser. A**, v. 1, n. 106, p. 491-511, 2006.

GAMS. On-line documentation. Disponível em: <
<http://www.gams.com/docs/document.htm>>. Acesso em: 06/05/2013.

GOLDEN, B. L., MAGNANTI, T. L., NGUYAN, H. Q. Implementing vehicle routing algorithms. **Networks**, vol. 7. n.2, p.113–148, 1972.

GOLDEN, B. L.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. A. **The vehicle routing problem: latest advances and new challenges**. Berlin: Springer-Verlag, 589p, 2008.

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, 8 ago 2007.

GROUNHAUG, R.; CHRISTIANSEN, M. Supply Chain optimization for the liquefied natural gas business. **Innovations in Distribution Logistics**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol. 619, p.195-218, 2009.

GUROBI. Documentation and Examples. Disponível em: <
<http://www.gurobi.com/resources/documentation>>. Acesso em: 06/05/2013.

HAUGEN, K. K. A Stochastic Dynamic Programming model for scheduling of offshore petroleum fields with resource uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 88, n. 1, p. 88-100, jan 1996.

HENNIG, F.; NYGREEN, B.; CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; FURMAN, K.C.; SONG, J.; KOCIS, G.R.; WARRICK, P.H. Maritime crude oil transportation - A split pickup and split delivery problem. **European Journal of Operational Research**, n.218, v.01, p.764-774, 2012.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, H., SALAZAR-GONZÁLEZ, J. A branch-and-cut algorithm for a traveling salesman problem with pickup and delivery. **Discrete Applied Mathematics**. n.145, 126–139, 2004.

HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLE, G.; LØKKETANGEN, A. Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 12, p. 2041-2061, 2010.

HWANG, S.J. **Inventory Constrained Maritime Routing and Scheduling for Multi-Commodity Liquid Bulk**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial e de Sistemas). School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.

IBM. CPLEX Optimizer. Disponível em: < <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/>>. Acesso em: 06/05/2013. (a)

IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Information Center. Disponível em: < <http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r4/index.jsp>>. Acesso em: 06/05/2013. (b)

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Oil Market Report February 2013**. Disponível em: <http://www.oilmarketreport.org/>. Acesso em 15/04/2013.

JÜRGEN, M.; REINELT, G.; RINALDI, G. The Traveling Salesman Problem. In: BALL, M.O.; MAGNANTI, T.L.; MONNA, C.L.; NEMHAUSER, G.L. **Network Models**. Handbooks in Operations Research and Management Science, vol.7, North-Holland, 1995.

KOBAYASHI, K.; KUBO, M. Optimization of oil tanker schedules by decomposition, column generation, and time-space network techniques. **Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics**, v. 27, n. 1, p. 161-173, 2010.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y. Exact algorithms for the vehicle routing problem. In: S. MARTELLO, G. LAPORTE, M. MINOUX; C. RIBEIRO. **Surveys in Combinatorial Optimization**. North-Holland, Amsterdam, 147-184, 1987.

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. Fifty Years of Vehicle Routing. **Transportation Science**, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.

LASSCHUIT, W.; THIJSSSEN, N. Supporting supply chain planning and scheduling decisions in the oil and chemical industry. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, n. 6-7, p. 863-870, 2004.

LENSTRA, J.K; RINNOOY KAN, A.H.G. Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. **Networks**, n.2, v.11, p.221-227, 1981.

LIN, S. Computer Solutions of the Traveling Salesman Problems. **Bell Systems Technical Journal**, v. 44, n. 1, p. 2245-2269, 1965.

MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 5, p. 481-496, 2000.

MARTINS, Roberto A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, Paulo A.M (org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, pp.45-61.

MCKAY, M. D.; HARTLEY, H. O. Computerized scheduling of seagoing tankers. **Naval Research Logistics**, v. 21, n. 2, p. 255-264, 1974.

MEREDITH, J.R.; RATURI, A.; AMOAKO-GYAMPAH, K.; KAPLAN, B. Alternative research paradigms in operations. **Journal of Operations Management**, vol. 8, p.297-326, 1989.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2010, p.165-194.

NOWAK, M.; ERGUN, O.; WHITE, C. C. Pickup and Delivery with Split Loads. **Transportation Science**, v. 42, n. 1, p. 32-43, 2008.

NOWAK, M.; ERGUN, O.; WHITE, C. C. An empirical study on the benefit of split loads with the pickup and delivery problem. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 3, p. 734-740, 2009.

PERAKIS, A.; BREMER, W. M. An operational tanker scheduling optimization system: background, current practice and model formulation. **Maritime Policy and Management**, v. 19, n. 3, p. 177-187, 1992.

PERSSON, J. A.; GÖTHE-LUNDGREN, M. Shipment planning at oil refineries using column generation and valid inequalities. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 631-652, 2005.

PETROBRAS. Perfil - Uma empresa integrada de Energia. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil>>. Acesso em: 28/03/2014. (a)

PETROBRAS. Quem somos – Nossa História. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 28/03/2014. (b)

PETROBRAS. Exploração e Produção de Petróleo e Gás. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/>>. Acesso em 15/04/2014. (c)

PETROBRAS. Pré-Sal: Novo patamar de reservas e produção de petróleo. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/petroleo/presal/>>. Acesso em 11/06/2014. (d)

PFC ENERGY. **PFC Energy 50 – The definitive Annual Ranking of the world's largest listed energy firms**, 2013.

POCHET, Y.; WOLSEY, L.A. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer, 2006.

POTVIN, J.Y.; ROUSSEAU, J.M. An exchange heuristic for routing problems with time windows. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 16, n. 12, p. 1433- 1446, 1965.

PUCU, P.A.B. **Logística do escoamento da produção de petróleo de plataformas offshore via transporte naval**. 49 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, 2011.

PUREZA, V.; MORABITO, R.; REIMANN, M. Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. **European Journal of Operational Research**, v. 218, n. 3, p. 636-647, 2012.

REVISTA DO AÇO. Terminal de contêineres de Paranaguá ganha produtividade e adiciona nova linha. Disponível em: <http://www.revistadoaco.com.br/terminal-de-conteneres-de-paranagua-ganha-produtividade-e-adiciona-nova-linha/>. Acesso em: 16/04/2013.

REVISTA FUNDAÇÕES E OBRAS GEOTÉCNICAS. Terminal Baía de Ilha Grande, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.revistafundacoes.com.br/imagens/2012/05/20120528_091114_Terminal%20Ba%C3%ADa%20de%20Iha%20Grande.jpg >. Acesso em 24/05/2013.

ROCHA, R.; GROSSMANN, I. E.; POGGI DE ARAGÃO, M. V. S. Petroleum allocation at PETROBRAS: Mathematical model and a solution algorithm. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 12, p. 2123-2133, 2009.

RODRIGUE, H.D.; COMTOIS, C.; SLACK, B. **The Geography of Transport Systems**. Second Edition, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, New York: Routledge, 2009. Disponível em: <<http://www.people.hofstra.edu/geotrans/>>. Acesso em: 29-Mai-2012.

RONEN, D. Cargo ships routing and scheduling : Survey of models and problems. **European Journal of Operational Research**, v. 12, n. 4, p. 119-126, 1983.

RONEN, D. Short-Term Scheduling of Vessels for Shipping Bulk or Semi-Bulk Commodities Originating in a Single Area. **Operations Research**, v. 34, n. 1, p. 164-173, 1986.

RONEN, D. Ship scheduling: the last decade. **European Journal of Operational Research**. n.71, vol.3, p.325-333, 1993.

SAVELSBERGH, M.W.P. Local search in routing problems with time windows. **Annals of Operations Research**, vol. 4, 285–305, 1985.

SAVELSBERGH, M. W. P.; SOL, M. The General Pickup and Delivery Problem. **Transportation Science**, v. 29, n. 1, p. 17-29, 1995.

SHERALI, H.D.; AL-YAKOUB, S.M.; HASSAN, M.M. Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. **IIE Transactions**, n. 31, vol.5, p.395–406, 1999.

SHREVE, R. N.; BRINK J.R. **Indústrias de processos químicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

SOBENA – SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENGENHARIA NAVAL. Principais Medidas, Dimensões e Características do Navio. Disponível em: <http://www.sobena.org.br/downloads/diciona_navai/Principais%20Medidas.pdf>. Acesso em: 15/04/2013.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, n. 35, vol. 2, p.254-256, 1987.

SONG, J.-H.; FURMAN, K. C. A maritime inventory routing problem: Practical approach. **Computers & Operations Research**, v. 40, p. 657-665, 2013.

STÅLHANE, M.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; CORDEAU, J.-F.; DESAULNIERS, G. A branch-price-and-cut method for a ship routing and scheduling problem with split loads. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 12, p. 3361-3375, 2012.

TOTH, P.; VIGO, D. Exact algorithms for vehicle routing. In: CRAINIC, T.; LAPORTE, G.. **Fleet management and logistics**. Kluwer Academic Publishers, Boston, p.1-31, 1998.

TOTH, P.; VIGO, D. **The vehicle routing problem**. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. Philadelphia: SIAM. 363p. 2002.

UFRJ – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **Posicionamento Dinâmico**. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/Alex+Lorena/relat1/Posicionamento%20Dinamico.htm>. Acesso em 15/04/2013.

UGGEN, K. T.; FODSTAD, M.; NØRSTEBØ, V. S. Using and extending fix-and-relax to solve maritime inventory routing problems. **Top**, vol.3, 2011.

UNCTAD. United Nations Conference on Trade and Development. **Review of Maritime Transport 2012**. United Nations, New York. Disponível em: <http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2012_en.pdf>. Acesso em: 19/04/2013.

UNICAMP – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **O que é petróleo.** Departamento de Engenharia de Petróleo. Disponível em: <http://www.dep.fem.unicamp.br/petro.htm>. Acesso em 15-Jun-2012.

VATN, K.D. **Optimization of water-borne crude oil transport.** Trondheim:Department of Engineering Cybernetics. 95p. Dissertação de Mestrado, 2007.

WOLSEY, L.A. **Integer Programming.** Wiley-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization. John Wiley&Sons, 1998.

APÊNDICE A – DADOS DE ENTRADA PARA O EXEMPLAR N6 DO CONJUNTO DE DADOS 1

O exemplar N6 do conjunto de dados 1 apresenta uma lista de 33 navios disponíveis. Para rodá-lo foi utilizado um BIGM da ordem de 1.000.000. O quadro 8.1 apresenta as janelas de tempo inferior a_i e superior b_i em horas, além da quantidade de carga d_i a ser coletada ou entregue no nó i , definida em m^3 . Note que as quantidades negativas referem-se a entregas e as quantidades positivas referem-se a coletas.

Quadro 8.1 - Dados de janela de tempo inferior a_i , superior b_i , em horas, e quantidade de carga d_i , em m^3 , ser coletada ou entregue por nó para o conjunto de dados 1.

Tipo de nó	Nó i	a_i (h)	b_i (h)	d_i (m^3)
Depósitos artificiais de origem	1	0	640	0
	2	0	640	0
	3	0	640	0
	4	0	640	0
	5	0	640	0
	6	0	640	0
	7	0	640	0
	8	0	640	0
	9	0	640	0
	10	0	640	0
	11	0	640	0
	12	0	640	0
	13	0	640	0
	14	0	640	0
	15	0	640	0
	16	0	640	0
	17	0	640	0
	18	0	640	0
	19	0	640	0
	20	0	640	0
	21	0	640	0
	22	0	640	0
	23	0	640	0
	24	0	640	0
	25	0	640	0
	26	0	640	0
	27	0	640	0
	28	0	640	0
	29	0	640	0
	30	0	640	0
	31	0	640	0

	32	0	640	0
	33	0	640	0
Plataformas	34	208	256	30000
	35	208	256	50000
	36	352	376	16000
	37	352	376	42000
	38	472	496	20000
	39	544	568	10000
	Terminais	40	280	328
41		280	328	-50000
42		400	424	-16000
43		400	424	-42000
44		592	640	-20000
45		592	640	-10000
Depósitos artificiais de destino	46	0	640	0
	47	0	640	0
	48	0	640	0
	49	0	640	0
	50	0	640	0
	51	0	640	0
	52	0	640	0
	53	0	640	0
	54	0	640	0
	55	0	640	0
	56	0	640	0
	57	0	640	0
	58	0	640	0
	59	0	640	0
	60	0	640	0
	61	0	640	0
	62	0	640	0
	63	0	640	0
	64	0	640	0
	65	0	640	0
	66	0	640	0
	67	0	640	0
	68	0	640	0
	69	0	640	0
	70	0	640	0
	71	0	640	0
	72	0	640	0
	73	0	640	0
	74	0	640	0
	75	0	640	0
	76	0	640	0
	77	0	640	0
	78	0	640	0

O quadro 8.2 contém os dados de capacidade máxima em m³ e velocidade média em nós dos 33 navios disponíveis para o exemplar N6.

Quadro 8.2 - Dados de capacidade máxima Cap_k , em m^3 velocidade v_k , em nós, por navio para o conjunto de dados 1.

Navio k	Cap_k (m^3)	v_k (nós)
1	22686	12,000
2	84623	15,000
3	82911	15,000
4	53259	15,000
5	54127	16,000
6	115572	14,000
7	50714	14,000
8	121016	13,000
9	84623	13,000
10	173737	13,000
11	76492	13,000
12	77975	13,000
13	170000	14,000
14	171732	13,000
15	167929	13,000
16	167621	13,000
17	113373	13,000
18	110422	15,000
19	162275	14,000
20	42770	14,000
21	42771	13,000
22	110913	14,000
23	115615	13,000
24	166685	13,000
25	162665	13,000
26	165075	13,000
27	343108	13,000
28	332894	15,000
29	107225	13,000
30	76942	13,000
31	63032	13,000
32	75700	13,000
33	125993	13,000

O quadro 8.3 apresenta as distâncias $dist_{ij}$ entre os nós, definidas em milhas náuticas. Todas as distâncias que não estão representadas neste quadro são iguais a zero.

Quadro 8.3 - Distância $dist_{ij}$ entre os nós, em milhas náuticas, para o conjunto de dados 1.

	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
2	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
3	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
4	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
5	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
6	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
7	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
8	910	910	910	910	381	910	812	812	812	812	812	812
9	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
10	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
11	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
12	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
13	1270	1270	1270	1270	749	1270	1157	1157	1157	1157	1157	1157
14	1438	1438	1438	1438	957	1438	1339	1339	1339	1339	1339	1339
15	1438	1438	1438	1438	957	1438	1339	1339	1339	1339	1339	1339
16	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
17	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
18	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
19	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
20	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
21	2217	2217	2217	2217	2694	2217	2374	2374	2374	2374	2374	2374
22	1438	1438	1438	1438	957	1438	1339	1339	1339	1339	1339	1339
23	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
24	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
25	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
26	1270	1270	1270	1270	749	1270	1157	1157	1157	1157	1157	1157
27	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
28	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
29	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
30	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
31	1047	1047	1047	1047	539	1047	934	934	934	934	934	934
32	1002	1002	1002	1002	484	1002	890	890	890	890	890	890
33	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	537	0	184	184	184	184	184	184
35	0	0	0	0	537	0	184	184	184	184	184	184
36	0	0	0	0	537	0	184	184	184	184	184	184
37	0	0	0	0	537	0	184	184	184	184	184	184
38	537	537	537	537	0	537	413	413	413	413	413	413
39	0	0	0	0	537	0	184	184	184	184	184	184
40	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
41	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
42	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
43	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
44	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0
45	184	184	184	184	413	184	0	0	0	0	0	0

O quadro 8.4 representa a matriz $A(i,k)$ que define a incompatibilidade de atracação em um ponto operacional. Se o navio k não pode atracar no ponto operacional i , assume-se o valor 1; caso contrário, o valor é zero. Para os demais valores não apresentados no quadro, o valor é zero e, portanto, é permitida atracação.

Quadro 8.4 - Representação de incompatibilidade de atracação de navios em pontos operacionais para o conjunto de dados 1.

PO	Navios																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
40	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
41	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
42	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
43	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
44	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
45	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Por sua vez, o quadro 8.5 mostra os tempos de serviço ts_{ik} no nó i atendido pelo navio k , em horas.

APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA PARA O EXEMPLAR N16 COM $|K| = 10$ DO CONJUNTO DE DADOS 2

O exemplar N16 com $|K|=10$ do conjunto de dados 2 foi implementado com um BIGM da ordem de 1.000.000. O quadro 8.6 apresenta as janelas de tempo inferior a_i e superior b_i em horas e a quantidade de carga d_i a ser coletada ou entregue no nó i , definida em m^3 . Note que as quantidades negativas referem-se a entregas e as quantidades positivas referem-se a coletas. Além disso, para este conjunto de dados, há o vetor que representa o conjunto de plataformas com posicionamento dinâmico (DP), denotado por C_{DP} e definido da seguinte forma: se a plataforma apresenta DP, seu valor é 1; caso contrário, o valor é zero.

Quadro 8.1 - Dados de janela de tempo inferior a_i , superior b_i , em horas, e quantidade de carga d_i , em m^3 , a ser coletada ou entregue por nó e vetor de posicionamento dinâmico C_{DP} para o conjunto de dados 2.

Tipo de nó	Nó i	a_i (h)	b_i (h)	d_i (m^3)	C_{DP}
Depósitos artificiais de origem	1	0	530	0	0
	2	0	530	0	0
	3	0	530	0	0
	4	0	530	0	0
	5	0	530	0	0
	6	0	530	0	0
	7	0	530	0	0
	8	0	530	0	0
	9	0	530	0	0
	10	0	530	0	0
Plataformas	11	320	368	70000	1
	12	320	368	10000	1
	13	336	384	26000	0
	14	336	384	50000	0
	15	336	384	14000	0
	16	336	384	30000	0
	17	362	410	65600	1
	18	362	410	9500	1
	19	391	439	65600	1
	20	352	400	75000	0
	21	345	393	75000	1
	22	362	410	80000	0
	23	420	468	20400	1
	24	407	455	70000	1
	25	420	468	19600	1
26	409	457	50000	1	
Terminais	27	338	386	-70000	0
	28	338	386	-10000	0
	29	362	410	-26000	0

	30	362	410	-50000	0
	31	362	410	-14000	0
	32	362	410	-30000	0
	33	386	434	-65600	0
	34	386	434	-9500	0
	35	410	458	-65600	0
	36	410	458	-75000	0
	37	410	458	-75000	0
	38	410	458	-80000	0
	39	434	482	-20400	0
	40	434	482	-70000	0
	41	434	482	-19600	0
	42	434	482	-50000	0
Depósitos artificiais de destino	43	0	530	0	0
	44	0	530	0	0
	45	0	530	0	0
	46	0	530	0	0
	47	0	530	0	0
	48	0	530	0	0
	49	0	530	0	0
	50	0	530	0	0
	51	0	530	0	0
	52	0	530	0	0

O quadro 8.7 contém os dados de capacidade máxima em m^3 , velocidade média em nós dos 10 navios disponíveis para o exemplar N16. Além disso, o quadro dispõe também o vetor K_{DP} que representa o conjunto de navios com posicionamento dinâmico da seguinte forma: se o navio apresenta DP, seu valor é 1; caso contrário, o valor é zero.

Quadro 8.2 - Dados de capacidade máxima Cap_k , em m^3 , velocidade v_k , em nós, e vetor de posicionamento dinâmico K_{DP} por navio para o conjunto de dados 2.

Navio k	$Cap_k (m^3)$	v_k (nós)	K_{DP}
1	172100	15,000	0
2	121016	13,000	0
3	166392	15,000	1
4	170300	15,000	1
5	116450	14,000	1
6	116450	14,000	1
7	115572	14,000	1
8	116281	14,000	1
9	168756	15,000	1
10	119051	15,000	1

O quadro 8.8 apresenta as distâncias $dist_{ij}$ entre os nós, definidas em milhas náuticas. Todas as distâncias que não estão representadas neste quadro são iguais a zero.

Quadro 8.1 - Distância $dist_{ij}$ entre os nós, em milhas náuticas, para o conjunto de dados 2.

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
1	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
2	124	124	197	197	197	197	174	174	180	497	390	226	281	201	281	172	152	152	152	152	152	106	106	106	577	577	812	152	152	152	152	
3	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
4	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
5	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
6	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
7	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
8	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
9	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
10	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
11	0	0	94	94	94	94	78	78	79	566	180	84	307	94	307	83	221	221	221	221	221	221	253	253	253	678	678	649	221	221	221	221
12	0	0	94	94	94	94	78	78	79	566	180	84	307	94	307	83	221	221	221	221	221	221	253	253	253	678	678	649	221	221	221	221
13	94	94	0	0	0	0	17	17	12	636	112	37	224	39	224	3	327	327	327	327	327	327	261	261	261	709	709	628	327	327	327	327
14	94	94	0	0	0	0	17	17	12	636	112	37	224	39	224	3	327	327	327	327	327	327	261	261	261	709	709	628	327	327	327	327
15	94	94	0	0	0	0	17	17	12	636	112	37	224	39	224	3	327	327	327	327	327	327	261	261	261	709	709	628	327	327	327	327
16	94	94	0	0	0	0	17	17	12	636	112	37	224	39	224	3	327	327	327	327	327	327	261	261	261	709	709	628	327	327	327	327
17	78	78	17	17	17	17	0	0	26	631	173	325	241	32	241	44	307	307	307	307	307	307	300	300	300	730	730	644	307	307	307	307
18	78	78	17	17	17	17	0	0	26	631	173	325	241	32	241	44	307	307	307	307	307	307	300	300	300	730	730	644	307	307	307	307
19	79	79	12	12	12	12	26	26	0	645	185	37	233	36	233	10	314	314	314	314	314	314	238	238	238	703	703	605	314	314	314	314
20	566	566	636	636	636	636	631	631	645	0	739	643	514	653	514	636	345	345	345	345	345	345	429	429	429	741	741	512	345	345	345	345
21	180	180	112	112	112	112	173	173	185	739	0	96	336	92	336	168	461	461	461	461	461	461	374	374	374	841	841	475	461	461	461	461
22	84	84	37	37	37	37	325	325	37	643	96	0	241	10	241	189	335	335	335	335	335	335	288	288	288	717	717	620	335	335	335	335
23	307	307	224	224	224	224	241	241	233	514	336	241	0	245	0	227	177	177	177	177	177	177	175	175	175	458	458	836	177	177	177	177
24	94	94	39	39	39	39	32	32	36	653	92	10	245	0	245	37	345	345	345	345	345	345	285	285	285	722	722	621	345	345	345	345
25	307	307	224	224	224	224	241	241	233	514	336	241	0	245	0	227	177	177	177	177	177	177	175	175	175	458	458	836	177	177	177	177
26	83	83	3	3	3	3	44	44	10	636	168	189	227	37	227	0	322	322	322	322	322	322	252	252	252	713	713	603	322	322	322	322
27	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
28	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
29	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
30	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
31	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
32	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
33	253	253	261	261	261	261	300	300	238	429	374	288	175	285	175	252	84	84	84	84	84	84	0	0	0	527	527	890	84	84	84	84
34	253	253	261	261	261	261	300	300	238	429	374	288	175	285	175	252	84	84	84	84	84	84	0	0	0	527	527	890	84	84	84	84
35	253	253	261	261	261	261	300	300	238	429	374	288	175	285	175	252	84	84	84	84	84	84	0	0	0	527	527	890	84	84	84	84
36	678	678	709	709	709	709	730	730	703	741	841	717	458	722	458	713	457	457	457	457	457	457	527	527	527	0	0	1339	457	457	457	457
37	678	678	709	709	709	709	730	730	703	741	841	717	458	722	458	713	457	457	457	457	457	457	527	527	527	0	0	1339	457	457	457	457
38	649	649	628	628	628	628	644	644	605	512	475	620	836	621	836	603	934	934	934	934	934	934	890	890	890	1339	1339	0	934	934	934	934
39	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
40	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
41	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0
42	221	221	327	327	327	327	307	307	314	345	461	335	177	345	177	322	0	0	0	0	0	0	84	84	84	457	457	934	0	0	0	0

O quadro 8.9 representa a matriz $A(i,k)$ que define a incompatibilidade de atracação em um ponto operacional. Se o navio k não pode atracar no ponto operacional i , assume-se o valor 1; caso contrário, o valor é zero. Para os demais valores não apresentados no quadro, o valor é zero e, portanto, é permitida atracação. Note que há incompatibilidade de atracação somente para o terminal 38.

Quadro 8.1 - Representação de incompatibilidade de atracação de navios em pontos operacionais para o conjunto de dados 2.

PO	Navios									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

O quadro 8.10 mostra os tempos de serviço ts_{ik} no ponto operacional (PO) i atendido pelo navio k , em horas.

Quadro 8.2 - Tempos de serviço ts_{ik} no ponto operacional (PO) i , em horas, atendido pelo navio k para o conjunto de dados 2.

PO	Navios									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
12	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
13	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200
14	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
15	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800
16	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
17	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120
18	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900	1,900
19	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120	13,120
20	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
21	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
22	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000
23	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080	4,080
24	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
25	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920	3,920
26	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
27	9,762	13,882	10,097	9,865	14,427	14,427	14,536	14,448	9,955	14,112
28	1,395	1,983	1,442	1,409	2,061	2,061	2,077	2,064	1,422	2,016
29	3,626	5,156	3,750	3,664	5,359	5,359	5,399	5,366	3,698	5,241
30	6,973	9,916	7,212	7,046	10,305	10,305	10,383	10,320	7,111	10,080
31	1,952	2,776	2,019	1,973	2,885	2,885	2,907	2,890	1,991	2,822
32	4,184	5,950	4,327	4,228	6,183	6,183	6,230	6,192	4,267	6,048
33	9,148	13,010	9,462	9,245	13,520	13,520	13,623	13,540	9,329	13,225
34	1,325	1,884	1,370	1,339	1,958	1,958	1,973	1,961	1,351	1,915
35	9,148	13,010	9,462	9,245	13,520	13,520	13,623	13,540	9,329	13,225
36	10,459	14,874	10,818	10,570	15,457	15,457	15,575	15,480	10,666	15,120
37	10,459	14,874	10,818	10,570	15,457	15,457	15,575	15,480	10,666	15,120
38	11,156	15,866	11,539	11,274	16,488	16,488	16,613	16,512	11,377	16,128
39	2,845	4,046	2,942	2,875	4,204	4,204	4,236	4,210	2,901	4,113
40	9,762	13,882	10,097	9,865	14,427	14,427	14,536	14,448	9,955	14,112
41	2,733	3,887	2,827	2,762	4,040	4,040	4,070	4,045	2,787	3,951
42	6,973	9,916	7,212	7,046	10,305	10,305	10,383	10,320	7,111	10,080

O quadro 8.11, por sua vez, apresenta os valores de α_1^{jk} que consistem na percentagem da carga máxima permitida para o navio k realizar a atracação no terminal j . Observa-se que este valor é visto como uma flexibilização da restrição de incompatibilidade dada pela matriz $A(i,k)$. Desta forma, neste exemplar apenas o terminal 38 apresenta valores de α_1^{jk} .

Quadro 8.3 – Valores de α_1^{jk} que determinam a flexibilização de atracação para o conjunto de dados 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38	0.00	0.000	0.000	0.000	0.800	0.800	0.800	0.800	0.000	0.800

APÊNDICE C – CÓDIGO DO *RELAX-AND-FIX* EM GAMS PARA ESTRATÉGIA I

Neste exemplo do código, utiliza-se a ordenação pela razão entre custo (consumo) e capacidade do navio.

```

***** heuristica relax-and-fix *****

scalar m,iStop, menor_k, menorEl;
parameters vtControle(k),vtOrdCusto(k);

*Define o passo do relax-and-fix (m)

m=2;

*Inicializacao dos vetores
vtControle(k)=0;
vtOrdCusto(k)=-1;

Alias (k,k1);

*Ordenacao dos pedidos

loop(k1,
    menorEl=1000000;
    menor_k=-1;

* Percorre os navios segundo um criterio definido e descobre qual eh o menor

    loop(k,
        if (((vtControle(k) eq 0)),
            if (menorEl>(((ConsumoMovimento(k)- ConsumoStandByCC(k))/Cap(k))),
                menorEl=(((ConsumoMovimento(k)- ConsumoStandByCC(k))/Cap(k)));
                menor_k=ord(k);
            );
        );
    );

```

```

*Aloca na i-esima posicao no vetor vtOrdCusto

    if (menor_k <> -1,
        vtOrdCusto(k1)=menor_k;
        loop(k,
            if (ord(k) eq menor_k, vtControle(k)=1)
        );
    );
);

display vtControle, vtOrdCusto;

*fim da ordenacao

nn=min(1, card(k));
iStop=0;

while ((iStop eq 0),

*Relaxa Integralidade

loop(k,
    x.prior(i,j,k1)$((ord(k) <= (nn+(m-1)))AND(vtOrdCusto(k) eq ord(k1))) = 0);

loop(k,
    x.prior(i,j,k1)$((ord(k) > (nn+(m-1)))AND(vtOrdCusto(k) eq ord(k1))) = +inf);

    display x.prior;

*Resolve o MIP e fixa os valores inteiros |

    solve Modelo1 using MIP minimizing FO;
    Display nn, x.L,y.L,F.L,FO.l;

loop((i,j,k),

    if((ord(k)<=(nn+(m-1)))and(tipo(i) ne 1)and(tipo(j) ne 4)and(x.l(i,j,k) eq 1),

```

```
                x.fx(i,j,k) = x.l(i,j,k)
            );
        );
        if ((nn>=card(k)),iStop=1);
            nn=min((nn+m),card(k));
        );
* end of while nn

        scalar aux;

*   Devolve o valor de y para a escala original:
        y.L(i,k)=y.L(i,k)*1000;

        Display x.L,y.L,F.L,FO.l;
        Display ts;

***** fim heuristica relax-and-fix *****
```

APÊNDICE D – PSEUDOCÓDIGO DO *RELAX-AND-FIX* PARA ESTRATÉGIA II

Parâmetros

- m é o número de pedidos que serão selecionados em cada uma das iterações (é o passo do algoritmo);
- int é o número total de iterações que o algoritmo realizará, onde $int = n / m$;
- nn é o índice que controla as iterações;
- $iStop$ é uma variável para indicar o critério de parada do algoritmo;
- $vtControle[j]$ é um vetor que guarda os pedidos que já foram ordenados;
- $vtEDDPedido[j]$ é um vetor que guarda a ordenação dos pedidos de acordo com seu a_i mais cedo, regra conhecida como EDD (*earliest due date*);
- $menor_j$ é uma variável auxiliar que computa a identificação do pedido j com o tempo mais cedo;
- $menorEl$ é uma variável auxiliar que computa o valor da janela de tempo a_i respectiva ao pedido j ;
- $vtPred[i]$ é um vetor que guarda o nó predecessor ao nó i ;
- $vtSucessor[i]$ é um vetor que guarda o nó sucessor ao nó i ;

*{*Inicializações de Variáveis*}*

m (passo definido pelo usuário);

$int=n/m$;

$iStop=0$;

$vtControle[j]=0$;

$vtEDDPedido[j]=-1$;

$nn=0$;

$menor_j=-1$;

$menorEl=1000000$;

$vtPred[i]=-1$;

$vtSucessor[i]=-1$;

Procedimento Ordenação_Pedidos**Para** $i = 1, \dots, n$ **faça****Para** $j = 1, \dots, n$ **faça****Se** $j \in C_2$ e $vtControle[j] = 0$ **então****Se** $menorEl > a[j]$ **então** $menorEl \leftarrow a[j]$; $menor_j \leftarrow j$;**Fim-se****Fim-para.j****Se** $menor_j \neq -1$ **então** $vtEDDPedido[i] \leftarrow menor_j$;**Para** $j = 1, \dots, n$ **faça****Se** $j < menor_j$ **então** $vtControle[j] \leftarrow 1$ **Fim-se****Fim-para.j****Fim-se****Fim-para.i****Fim-Procedimento****Procedimento Relax_and_Fix****Enquanto** $iStop = 0$ **faça** $nn = nn + 1$;**Para** $i = 1, \dots, n$ **faça****Para** $j = 1, \dots, n$ **faça****Se** $i > (1 + (nn - 1) * m)$ e $i < (nn * m)$ **então****Se** $j = vtEDDPedido[i]$ **então** $vtPred[j] \leftarrow 0$;

$vtSucessor[j] \leftarrow 0;$

$vtPred[j+n] \leftarrow 0;$

$vtSucessor[j+n] \leftarrow 0;$

Fim-se

Fim-se

Fim-para.j

Fim-para.i

Para $i = 1, \dots, n$ **faça**

Para $j = 1, \dots, n$ **faça**

Para $k = 1, \dots, |K|$ **faça**

Relaxar_Integralidade[i, j, k];

Fim-para.k

Fim-para.j

Fim-para.i

Para $i = 1, \dots, n$ **faça**

Para $j = 1, \dots, n$ **faça**

Para $k = 1, \dots, |K|$ **faça**

Se $i = s(k)$ **ou** $j = e(k)$

Impor_Integralidade[i, j, k];

Fim-para.k

Fim-para.j

Fim-para.i

Para $i = 1, \dots, n$ **faça**

Para $j = 1, \dots, n$ **faça**

Para $k = 1, \dots, |K|$ **faça**

Se $vtPred[i] = 0$ **ou** $vtSucessor[j] = 0$

Impor_Integralidade[i, j, k];

Fim-para.k

Fim-para.j

Fim-para.i

Comando GAMS Resolver_MIP_Resultante

Para $i = 1, \dots, n$ **faça**

Para $j = 1, \dots, n$ **faça**

Para $k = 1, \dots, |K|$ **faça**

Se $x[i, j, k] = 1$ **e** $vtPred[j] = 0$ **e** $vtSucessor[i] = 0$

$x[i, j, k] \leftarrow 1;$

$vtPred[j] \leftarrow i;$

$vtSucessor[i] \leftarrow j;$

Fim-se

Fim-para.k

Fim-para.j

Fim-para.i

Se $ModelStat <> 1$ **ou** $ModelStat <> 8$ **então**

$iStop = 1;$

Fim-se

Se $nn = int$ **então**

$iStop = 1;$

Fim-se

Fim-enquanto

Fim-Procedimento

APÊNDICE E – CÓDIGO DO *RELAX-AND-FIX* EM GAMS PARA ESTRATÉGIA II

Declaração de parâmetros e inicialização de variáveis

```
parameter vtFixo(k),
           vtSeq(k),
           vtControle(j),
           vtEDDPedido(i),
           vtNohRoteirizado(j),
           vtNavioAlocado(j),
           vtPred(i),
           vtSucessor(i);

* quantidade de coletas selecionadas em cada iteracao
m=2;
* int - quantidade de iteracoes do relax-and-fix
int=n/m;
iStop=0;
vtFixo(k)=0;
vtControle(j)=0;
vtEDDPedido(j)=-1;
nn=0;
menor_j=-1;
menorEl=1000000;

*novos vetores e variaveis
vtPred(i)=-1;
vtSucessor(i)=-1;

display vtControle, vtEDDPedido;
```

Procedimento de ordenação de pedidos

```

#####aqui começa a ordenacao dos pedidos

loop(i,
  menorEl=1000000;
  menor_j=-1;

  * percorre as janelas de tempo e descobre qual eh a menor que nao foi alocada

  loop(j,
    if (((tipo(j) eq 2)AND(vtControle(j) eq 0)),
      if (menorEl>a(j),
        menorEl=a(j);
        menor_j=ord(j);
      );
    );
  );

  *fim do loop j
  * Aloca a coleta da i-esima posicao no vetor vtEDDPedido
  if (menor_j <> -1,
    vtEDDPedido(i)=menor_j;
    loop(j,
      if (ord(j) eq menor_j, vtControle(j)=1)
    );
  );
);
*fim do loop i
#####fim da ordenacao em EDD

*display vtEDDPedido, vtControle;

* fim da ordenacao dos pedidos.

```

Procedimento para percorrer os pares coleta/entrega selecionados aplicando o conceito de relax-and-fix

```

while (istop eq 0,
    nn=nn+1;

    * escolhendo as coletas e entregas da iteracao
    * estao sendo escolhidos os arcos de entrada e saida das coletas e entregas
    loop((i,j)$((ord(i) ge (1+(nn-1)*m) and (ord(i) le (nn*m))),
        vtPred(j)$ (ord(j) eq vtEDDPedido(i)) = 0;
        vtSucessor(j) $ (ord(j) eq vtEDDPedido(i)) = 0;
        vtPred(j+n)$ (ord(j) eq vtEDDPedido(i)) = 0;
        vtSucessor(j+n) $ (ord(j) eq vtEDDPedido(i)) = 0;
    );

    * relaxa a integralidade de todas as variaveis

    loop((i,j,k),
        x.prior(i,j,k) = +inf;
    );

    * impoe integralidade das saidas e chegadas nos depositos artificiais

    loop((i,j,k)$((ord(i) eq s(k)) or (ord(j) eq e(k))),
        x.prior(i,j,k) = 0;
    )

    * impoe integralidade das coletas e entregas ainda nao roteizadas
    loop((i,j,k)$((vtPred(i) eq 0) or (vtSucessor(j) eq 0)),
        x.prior(i,j,k) = 0;
    );

    solve Modelo1 using MIP minimizing FO;

    Display x.L,y.L,F.L,FO.l,nn,vtControle, vtEDDPedido;

    * encontra os arcos diretos da iteracao e os fixa

    loop((i,j,k),
        if((x.l(i,j,k) eq 1) and (vtSucessor(i) eq 0) and (vtPred(j) eq 0)),
            x.fx(i,j,k) = 1;
            vtPred(j) = ord(i);
            vtSucessor(i) = ord(j);
        )
    );

```

```
Display x.L;
```

```
* verifica se a solucao encontrada eh factivel. Caso nao, pare o algoritmo
```

```
    if ((Modelo1.modelstat <> 1) and (Modelo1.modelstat <> 8),  
        iStop=1;  
    );
```

```
if ((mn eq int), iStop=1  
    );
```

```
);
```