



UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO EM TEMPO REAL DE
VEÍCULOS DE APOIO MARÍTIMO DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Sidney Augusto Kovalski

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Oceânica, COPPE, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Oceânica.

Orientador: Raad Yahya Qassim

Rio de Janeiro

Setembro de 2019

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO EM TEMPO REAL DE
VEÍCULOS DE APOIO MARÍTIMO DE PLATAFORMAS *OFFSHORE*

Sidney Augusto Kovalski

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph. D.

Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto, D. Sc.

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2019

Kovalski, Sidney Augusto

Um modelo de otimização de roteamento em tempo real
de veículos de apoio marítimo de plataformas *offshore* /
Sidney Augusto Kovalski. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2019

XIII, 68 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Raad Yahya Qassim

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Oceânica, 2019

Referências Bibliográficas: p. 63-65.

1. Logística. 2. Alocação de Recursos. 3. Otimização. 4.
Logística *offshore*. 5. Roteamento de veículos. I. Qassim,
Raad Yahya. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

"Life is too short to wake up with regrets. So love the people who treat you right. Forget about those who don't. Believe everything happens for a reason. If you get a chance, take it. If it changes your life, let it. Nobody said life would be easy, they just promised it would most likely be worth it." (Harvey MacKay)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e saúde, e aos meus pais, por permitirem que o estudo fosse sempre prioridade na minha vida, tornando assim este momento possível.

No desenvolvimento desta dissertação tenho ainda a agradecer ao professor Raad Yahya Qassim pela orientação, aprendizado, incentivo à pesquisa e amizade. Agradeço ainda ao amigo e colega Renan Maziero Rossetto por permitir minha dedicação a este projeto e por todo o aprendizado na área de logística *offshore*. Agradeço também ao amigo e colega Bernardo Tabet pela ajuda e sugestões na elaboração deste trabalho.

Por fim, expresso meu reconhecimento pela contribuição essencial do professor Marlin W. Ulmer ao sugerir a abordagem para formular e resolver o problema tratado neste estudo, assim como por todo o suporte prestado durante o desenvolvimento do mesmo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO EM TEMPO REAL DE
VEÍCULOS DE APOIO MARÍTIMO DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Sidney Augusto Kovalski

Setembro/2019

Orientador: Raad Yahya Qassim

Programa: Engenharia Oceânica

Na cadeia logística *upstream* da indústria de óleo e gás, o problema de roteamento de embarcações supridoras para grupos de plataformas possui diversas variantes. A variante tratada neste trabalho diz respeito ao roteamento destas embarcações, no qual dois tipos de solicitações de serviço são permitidos: solicitações de serviço planejadas, as quais ocorrem antes do zarpe da embarcação de suprimento da base portuária, e solicitações de serviço aleatórias, as quais ocorrem durante a viagem da embarcação de suprimento através das plataformas clientes. Diante da complexidade do problema estocástico de roteamento dinâmico de veículos (SDVRP - *Stochastic Dynamic Vehicle Routing Problem*) ao qual pertence a variante estudada, a contribuição deste trabalho está na modelagem matemática e na heurística de reotimização de programação linear inteira mista em duas etapas. O desempenho da heurística computacional desenvolvida é então avaliado usando um caso real da indústria do petróleo no Atlântico Sul. Nesta avaliação para os valores de grau de dinamismo encontrados, a razão competitiva de todas as instâncias consideradas não está distante do valor unitário, fato que comprova a qualidade da heurística empregada neste trabalho.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

A REAL-TIME OPTIMIZATION MODEL FOR PLATFORM SUPPLY VEHICLES
ROUTING

Sidney Augusto Kovalski

September/2019

Advisor: Raad Yahya Qassim

Department: Oceanic Engineering

In the upstream logistics chain of the oil and gas industry, the supply vessel routing problem in offshore platform groups possesses various variants. The problem variant treated in this work is concerned with the routing of supply vessels whereby two types of service requests are allowed: planned service requests, which are placed prior to supply vessel departure from base port, and random service requests, which are placed during supply vessel tour. In view of the complexity of the stochastic dynamic vehicle routing problem (SDVRP) to which the problem variant studied in this paper belongs, the contribution of this paper is in the mathematical modeling approach and the proposed two-step mixed integer linear programming (MILP) reoptimization heuristic. Assessment of the computational heuristics performance is carried out using a real world case study based on industry practice in the South Atlantic Ocean. In this evaluation for the values of degree of dynamism that is encountered in industrial practice, the competitive ratio of all considered instances is not far from the unit value, a fact that proves the quality of the heuristic employed in this work.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivo	4
1.3	Estrutura da dissertação.....	5
2	CADEIA LOGÍSTICA MARÍTIMA OFFSHORE.....	6
2.1	Estrutura da cadeia logística <i>offshore</i>	6
2.2	Logística de apoio marítimo <i>offshore</i>	7
2.2.1	Plataformas <i>offshore</i> ou plataformas clientes	8
2.2.2	Embarcações para apoio logístico <i>offshore</i>	11
2.2.3	Ciclo de atendimento logístico – modal marítimo.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	22
4.1	Declaração do problema.....	22
4.2	Proposições simplificadoras	25
5	MODELO MATEMÁTICO	27
5.1	Modelo de roteamento markoviano baseado em decisão	27
5.2	Exemplos ilustrativos	28
5.2.1	Exemplo de pedido de serviço aleatório prioritário (PRSR).....	28
5.2.2	Exemplo de pedido de serviço aleatório não prioritário (NRSR)	30
6	METODOLOGIA DE SOLUÇÃO	33
6.1	Fluxo lógico do processo	33
6.2	Notação matemática.....	35
6.3	Algoritmo computacional de reotimização.....	35
6.4	Pseudocódigo.....	36
6.4.1	Algoritmo principal	36
6.4.2	Sub-algoritmo	37

6.5	Modelo programação linear inteira mista	37
6.5.1	Parâmetros.....	38
6.5.2	Variável de decisão	39
6.5.3	Função objetivo e restrições	39
7	ESTUDO COMPUTACIONAL.....	41
7.1	Análise competitiva dos resultados.....	42
7.2	Instâncias - Grupo de quatro plataformas	47
7.2.1	Instância 01	47
7.2.2	Instância 02	48
7.3	Instâncias - Grupo de doze plataformas	48
7.3.1	Instância 01	49
7.3.2	Instância 02	50
7.3.3	Instância 03	51
7.3.4	Instância 04	52
7.3.5	Instância 05	53
7.3.6	Instância 06	54
7.3.7	Instância 07	56
7.3.8	Instância 08	57
7.3.9	Instância 09	58
8	CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	60
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
	Apêndice A	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética mundial (Fonte: World Energy Outlook 2018 [1])	2
Figura 1.2 – Macro fluxo da logística upstream (Fonte: Agra [2]).....	3
Figura 2.1 – Elos da cadeia do petróleo (Fonte: Ferreira Filho [3]).....	7
Figura 2.2 – Navio-sonda Ocean Rig Corcovado (Fonte: energynorthern.com)	9
Figura 2.3 – FPSO Pioneiro de Libra (Fonte: odebrecht.com).....	10
Figura 2.4 – PLSV Sapura Diamante (Fonte: sapura.com.br)	11
Figura 2.5 – Embarcação de suprimento do tipo PSV (Fonte: solstad.com)	11
Figura 2.6 – Ciclo de atendimento a um agrupamento de plataformas clientes (Fonte: imagem elaborada pelo autor).....	15
Figura 5.1 – Exemplo de PRSR	30
Figura 5.2 – Exemplo de NRSR – Parte 1.....	31
Figura 5.3 – Exemplo de NRSR – Parte 2.....	32
Figura 6.1 – Fluxograma (sequenciamento lógico das etapas)	34
Figura 7.1 – Tempo computacional versus número de clientes	42
Figura 7.2 - Número de viagens feitas pelas embarcações vs. número de RSR	45
Figura 7.3 - Rota de uma embarcação ao longo de quatro plataformas (Fonte: imagem elaborada pelo autor).....	45
Figura 7.4 - Grupo de doze plataformas (Fonte: imagem elaborada pelo autor).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características técnicas de embarcação do tipo PSV - Valores médios	12
Tabela 2.2 – Velocidades de navegação para embarcações do tipo PSV.....	13
Tabela 7.1 – Matriz de distância entre as plataformas offshore (X, Y, Z e W)	44
Tabela 7.2 - Matriz de distância entre as plataformas offshore (A, B, C, ..., K, L).....	46
Tabela 7.3 – Parâmetros resultantes da instância 01 (quatro plataformas)	47
Tabela 7.4 – Parâmetros resultantes da instância 02 (quatro plataformas)	48
Tabela 7.5 - Parâmetros resultantes da instância 01 (doze plataformas)	49
Tabela 7.6 - Parâmetros resultantes da instância 02 (doze plataformas)	50
Tabela 7.7 - Parâmetros resultantes da instância 03 (doze plataformas)	51
Tabela 7.8 - Parâmetros resultantes da instância 04 (doze plataformas)	52
Tabela 7.9 - Parâmetros resultantes da instância 05 (doze plataformas)	53
Tabela 7.10 - Parâmetros resultantes da instância 06 (doze plataformas)	55
Tabela 7.11 - Parâmetros resultantes da instância 07 (doze plataformas)	56
Tabela 7.12 - Parâmetros resultantes da instância 08 (doze plataformas)	57
Tabela 7.13 - Parâmetros resultantes da instância 09 (doze plataformas)	58

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Número de plataformas;
i	Índice da posição de origem;
j	Índice da posição de destino;
k	Subscrito para o instante de tempo;
S_k	Estado de pré-decisão;
S_k^x	Estado de pós-decisão;
t_k	Instante de tempo;
x_k	Decisão;
w_k	Transição estocástica;
P_k	Posição atual;
$A_{i,k}, A_{j,k}$	Lista de visitas regulares (PSR) no instante k ;
$B_{i,k}, B_{j,k}$	Lista de visitas regulares (RSR) no instante k ;
$a_{i,k}, a_{j,k}$	Cliente na lista $A_{i,k}$;
$b_{i,k}, b_{j,k}$	Cliente na lista $B_{i,k}$;
d_{ij}	Distância entre do plataforma i para a plataforma j ;
y_i	Parâmetro inteiro que assume o valor 1 se a plataforma i demandar visita do tipo PSR, do contrário, assume o valor 0;
z_i	Parâmetro inteiro que assume o valor 1 se a plataforma i demandar visita do tipo RSR, do contrário, assume o valor 0;
x_{ij}	Variável binária que assume o valor 1 se a embarcação navega diretamente de i para j na solução, do contrário, assume o valor 0;
u_i, u_j	Variáveis auxiliares utilizadas para eliminação de sub-rotas;

LISTA DE ABREVIATURAS

CR	<i>Competitive Ratio;</i>
DOD	<i>Degree of Dynamism;</i>
DSV	<i>Diving Support Vesse;</i>
E&P	<i>Exploração e Produção;</i>
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading;</i>
IEA	<i>International Energy Agency;</i>
MDP	<i>Markov Decision Process;</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming;</i>
NRSR	<i>Non-priority Random Service Request;</i>
OPL	<i>Optimization Programming Language;</i>
PLSV	<i>Pipe Laying Support Vessels;</i>
PRSR	<i>Priority Random Service Request;</i>
PSR	<i>Planned Service Request;</i>
PSV	<i>Platform Supply Vessel;</i>
RSR	<i>Random Service Request;</i>
RV	<i>Research Vessel;</i>
SDVRP	<i>Stochastic Dynamic Vehicle Routing Problem;</i>
SVRPPD	<i>Single Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery;</i>
TPB	<i>Tonelada Porte Bruto;</i>
TSP	<i>Travel Sales Problem;</i>
VNS	<i>Variable Neighbourhood Search;</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem;</i>
WSV	<i>Well Stimulation vessel;</i>

1 INTRODUÇÃO

Conforme dados e previsões extraídos do relatório “*World Energy Outlook 2018*” [1] publicado pela *International Energy Agency* (IEA) o petróleo e demais combustíveis fósseis continuarão a desempenhar um papel de liderança na matriz energética mundial, com a crescente demanda impulsionada pelas necessidades de transporte comercial e requisitos de matéria-prima para a indústria de produtos químicos.

Como pode ser visto na Figura 1.1, em uma escala mundial em termos percentuais, os hidrocarbonetos (carvão, petróleo e gás natural) representaram em 2016 aproximadamente 80% da energia primária consumida, sendo o petróleo a fonte energética mais utilizada, ficando o carvão em segundo lugar e o gás natural em terceiro.

Conforme previsões do relatório mencionado anteriormente, o petróleo perderá ligeiramente sua participação no mix global de fontes de energia primária, mas continuará a representar uma parcela significativa desta mesma matriz. O gráfico a esquerda da Figura 1.1 nos traz uma perspectiva da demanda desta fonte ao longo dos anos em termos de milhões de barris por dia (mb/d). Notadamente é possível observar que apesar da parcela participativa diminuir, o volume demandado é maior, visto o aumento da demanda energética nos próximos anos principalmente na Ásia, na África e na Américas do Sul e Central. Vale mencionar ainda que a produção brasileira de petróleo deve crescer no médio e no longo prazo, alcançando os 3.9 mb/d em 2024 e ultrapassando os 5 mb/d em 2040.

Com relação a segunda fonte energética mais significativa nos dias atuais, o carvão, este manterá uma participação expressiva em partes do mundo, mas perderá ao longo dos anos uma parcela substancial à medida que o mundo transita para fontes de energia com emissões mais baixas.

Por fim, o gás natural, terceira fonte energética mais utilizada atualmente, crescerá mais do que qualquer tipo de energia, atingindo um quarto de toda a demanda mundial em 2040.

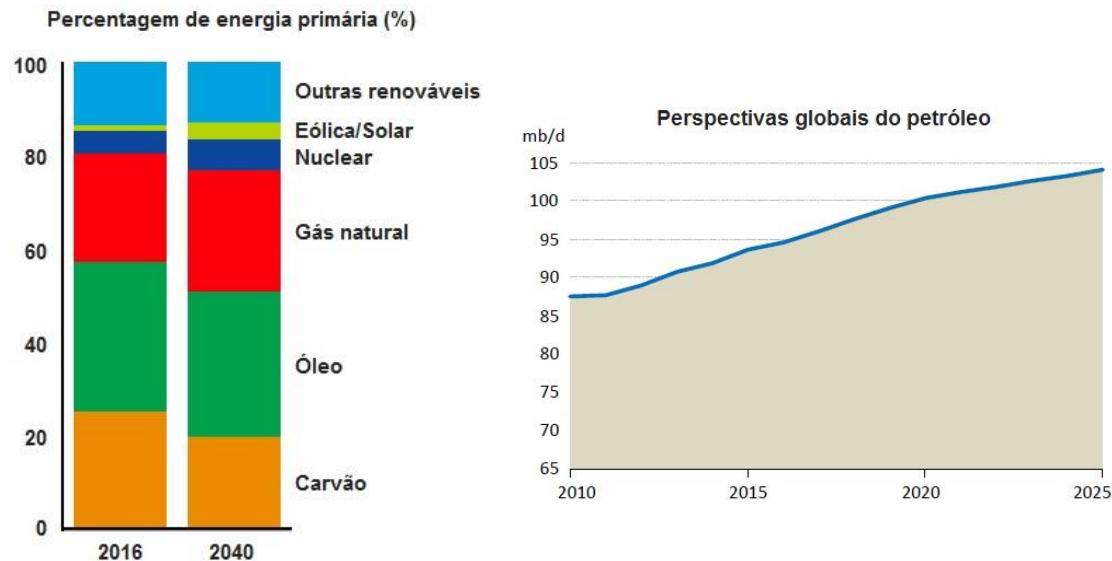


Figura 1.1 - Matriz energética mundial (Fonte: World Energy Outlook 2018 [1])

1.1 Motivação

Diante das previsões apresentadas na seção anterior, podemos inferir que as atividades de Exploração e Produção (E&P) na indústria de óleo e gás continuarão a existir nos próximos anos e décadas na mesma intensidade que existem hoje ou em intensidade ainda maior.

De modo a suportar as atividades de E&P faz-se necessário um sistema logístico e de serviços robusto, o qual é usualmente conhecido na indústria petrolífera mundial como logística *upstream* e na indústria brasileira como logística de apoio marítimo. Mais à frente na seção 2.1 definiremos melhor o conceito de logística *upstream*.

Este sistema é basicamente composto por um setor de armazenagem, uma infraestrutura aeroportuária e utiliza diversos tipos de veículos (embarcações

especializadas, aeronaves, carretas, etc.) e equipamentos (empilhadeiras, guindastes, etc.) para realização do transporte das cargas. Na Figura 1.2 podemos observar como se dá o fluxo de material e informações em um esquemático simplificado da logística de apoio marítimo. Na seção 2.2 este funcionamento será apresentado em mais detalhes para o leitor.

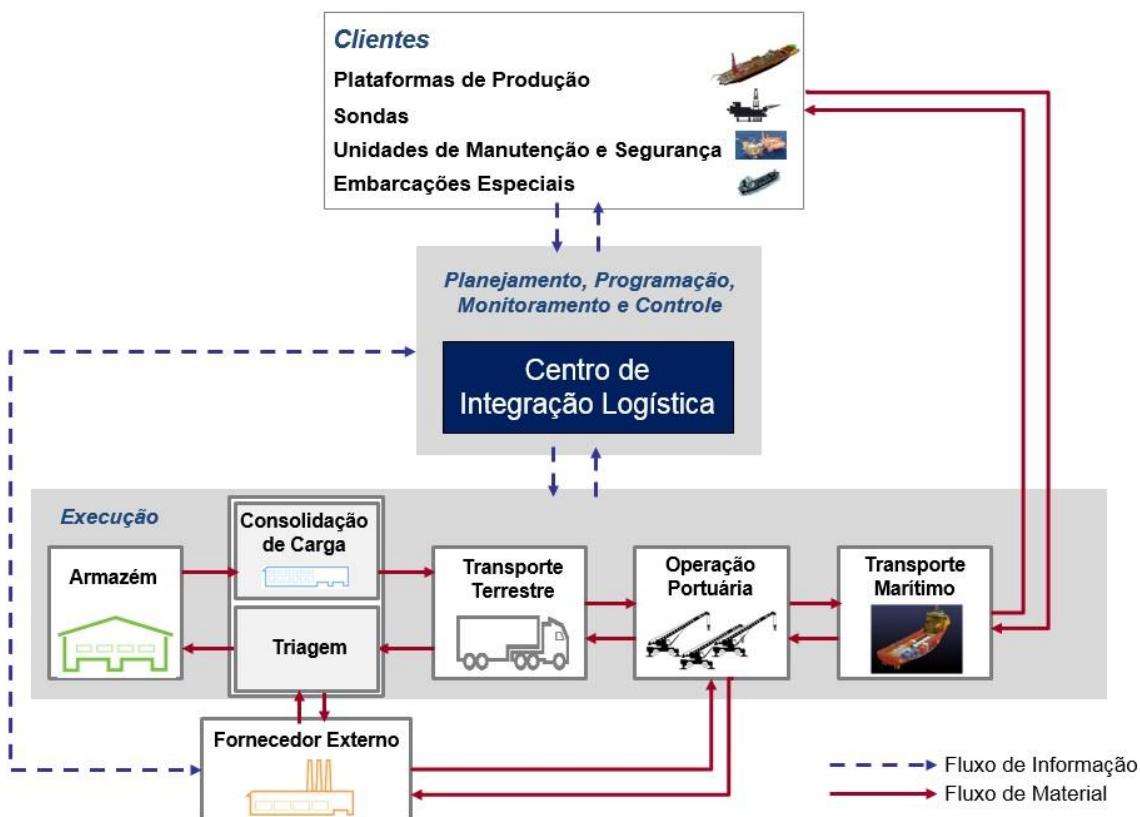


Figura 1.2 – Macro fluxo da logística upstream (Fonte: Agra [2])

Posto isto, de forma a suportar as atividades de E&P é essencial dimensionar as demandas logísticas, planejando e gerenciando os recursos disponíveis de forma adequada e eficiente.

O estudo conduzido por Agra [2] em 2018 corrobora com a afirmativa anterior, pois nele é citado que as embarcações de suprimento representam cerca de 70 a 80% dos custos logísticos totais dentro logística *upstream* para entrega de cargas. Ou seja, o

setor de transporte marítimo é o que concentra a maior parcela de gastos nas atividades de suporte às atividades de E&P. Dessa forma, podemos afirmar que os processos precisam ser constantemente avaliados e otimizados visando obter reduções nos custos operacionais gerais. Para tanto, faz-se necessário aumentar a produtividade ou eficiência das embarcações de apoio *offshore* para que assim seja possível reduzir o número de recursos, no caso embarcações de suprimento, sem que haja diminuição do nível de serviço.

1.2 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo primordial avaliar o efeito estocástico que as demandas extemporâneas das plataformas *offshore* como clientes do setor de logística de apoio marítimo atribuem aos processos de programação de embarcações e gerenciamento da frota disponível deste mesmo setor. Somado a isto, tem-se como objetivo específico a proposição de um novo modelo de roteamento de embarcações em tempo real que permita absorver e minimizar o efeito estocástico mencionado. Importante citar que este modelo é também aplicável a problemas de roteamento de veículos em geral.

Assim sendo, a avaliação do efeito estocástico para as demandas extemporâneas das plataformas *offshore* é a principal contribuição deste trabalho, visto não haver na literatura atual publicações que versem sobre o tema de forma específica para a cadeia logística *upstream* da indústria de óleo e gás. Somado a isto, a heurística de reotimização de programação linear inteira mista em duas etapas é a contribuição complementar do trabalho, a qual pode ser utilizada na solução de casos reais com praticidade.

1.3 Estrutura da dissertação

De forma a atender o objetivo exposto, esta dissertação foi organizada em oito capítulos, sendo este primeiro introdutório. No segundo capítulo são apresentados conceitos básicos da cadeia logística *offshore* de modo a permitir o leitor entender melhor o problema estudado e soluções propostas. No terceiro capítulo uma revisão bibliográfica é realizada com o intuito de consolidar informações acerca dos modelos e soluções logísticas utilizados no desenvolvimento das atividades de apoio marítimo *offshore* ao redor do mundo. No capítulo quatro o problema em consideração é declarado, assim como algumas proposições simplificadoras são ali definidas. Feito isto, no capítulo cinco a formulação matemática do modelo de roteamento proposto neste trabalho é detalhada com uso de exemplos práticos para facilitar o entendimento por parte do leitor. Como complemento, no capítulo seis a metodologia de solução em duas etapas, foco deste trabalho, é apresentada. No sétimo capítulo a metodologia de solução supracitada é então aplicada a um problema do mundo real vivenciado na plataforma sul do Oceano Atlântico, o qual está relacionado ao roteamento de embarcações de suprimento através de agrupamentos pré-definidos de plataformas *offshore*. Neste mesmo capítulo várias instâncias do problema são resolvidas com o objetivo de avaliar o desempenho computacional da heurística de reotimização em duas etapas proposta. O trabalho é então concluído no oitavo capítulo com uma avaliação do desempenho computacional da heurística proposta, juntamente com recomendações para pesquisas futuras.

2 CADEIA LOGÍSTICA MARÍTIMA OFFSHORE

Nesse capítulo será mostrado de forma simplificada conceitos básicos da cadeia logística *offshore* com o objetivo de proporcionar ao leitor conhecimento mínimo acerca do assunto para que assim possa assimilar melhor o problema estudado, o desenvolvimento do trabalho e a solução proposta.

2.1 Estrutura da cadeia logística *offshore*

Diferentes classificações são encontradas para os principais elos da cadeia do petróleo na literatura. Recentemente, entretanto, esta divisão tem ocorrido em três macro áreas, sejam elas: *upstream*, *midstream* e *downstream*.

De acordo com Ferreira Filho (2015) [3], a fase *upstream* está relacionada às atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural, ou seja, esta etapa é caracterizada pelas atividades de busca, identificação e localização das fontes de petróleo. A fase *midstream* por sua vez engloba as atividades de refino e parte da fase logística, ou seja, inclui as etapas de transporte do óleo extraído até as refinarias, local onde será processado e também inclui o transporte dos produtos derivados do petróleo das refinarias até as bases de distribuição. Já a fase *downstream* está relacionada às atividades de distribuição e revenda dos derivados do petróleo. Estas três divisões macro da indústria petrolífera podem ser melhor visualizadas na Figura 2.1.

Seguindo nesta mesma lógica de divisão, a logística *upstream* dentro de uma empresa de E&P é o que chamamos de logística *offshore*. Basicamente, esta logística é composta pelo transporte aéreo de pessoas e transporte de cargas no modal marítimo e terrestre entre os locais de armazenagem e plataformas *offshore*. Essencialmente o modal marítimo da logística *upstream* é realizado com uso de embarcações especialmente projetadas para esta finalidade. Na seção 2.2.2 serão apresentadas algumas características destas embarcações de suprimento *offshore*. A logística

midstream por sua vez, conforme mencionado anteriormente, é referente a etapa de transporte do óleo extraído pelas plataformas de produção até as refinarias, local onde serão processados para então serem levados aos centros de distribuição. Nesta etapa navios aliviadores, terminais portuários e oleodutos são utilizados para este transporte. Por fim, na logística *downstream* temos o envio dos produtos derivados de petróleo para os destinos de consumo, podendo nesta etapa serem utilizados diversos meios de transporte nos diversos modais existentes.

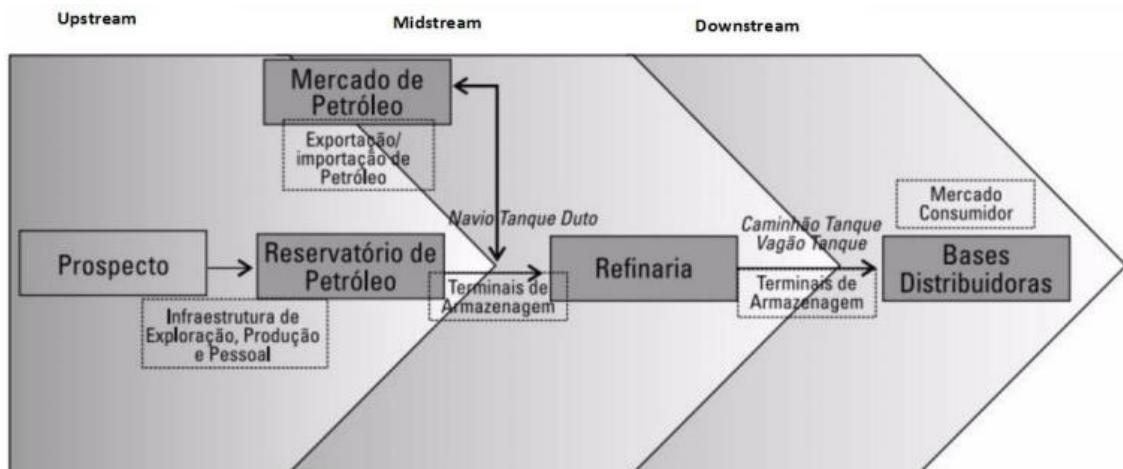


Figura 2.1 – Elos da cadeia do petróleo (Fonte: Ferreira Filho [3])

2.2 Logística de apoio marítimo offshore

Segundo Lopes (2011) [4], o fluxo de fornecimento de materiais no sistema logístico de apoio marítimo tem início na fase de aquisição de materiais, seja através de fornecedores nacionais ou internacionais, passa pelas etapas de armazenamento, triagem e consolidação de cargas, movimentação terrestre até bases portuárias e se encerra com o transporte no modal marítimo até as plataformas offshore. Este marco fluxo é melhor demonstrado na Figura 1.2.

Nesta mesma figura é possível perceber que existe um fluxo de informações paralelo ao fluxo de materiais. Este fluxo por sua vez se inicia com o pedido da

plataforma *offshore* ou plataforma cliente por um material específico ao detentor do mesmo, ou seja, ao armazém onde o material encontra-se estocado ou então a um fornecedor externo. Fornecedores externos são responsáveis por fornecer materiais para aplicação imediata, isto é, materiais fora de estoque. Feito o pedido, este é então processado, seja pelos armazéns ou fornecedores externos, de modo a disponibilizar os materiais à plataforma cliente demandante através do transporte terrestre até a base portuária, local onde o mesmo será embarcado, e transporte marítimo até a plataforma de destino.

Com base nesta breve descrição do sistema logístico *upstream* e o objetivo desta dissertação, um detalhamento dos tipos de clientes, embarcações utilizadas para realização do apoio marítimo *offshore* e informações acerca do ciclo logístico marítimo serão apresentados nos itens que seguem. Os demais elos da cadeia logística de E&P não serão detalhados, visto não fazerem parte do escopo deste estudo.

2.2.1 Plataformas *offshore* ou plataformas clientes

Nas atividades de E&P da indústria de petróleo e gás no meio *offshore* existe a demanda por diferentes tipos de plataformas ou unidades marítimas, sejam elas: sondas de perfuração, unidades de produção e embarcações especiais, as quais executam uma série de serviços auxiliares para a instalação e garantia da integridade dos sistemas produtivos.

As sondas de perfuração são unidades utilizadas primordialmente nas fases exploratórias e de desenvolvimento da produção dos campos de petróleo. Na Figura 2.2 podemos observar o navio sonda *Corcovado* da empresa Ocean Rig. Estas unidades, conforme Tabet e Lopes (2018) [5], são destinadas essencialmente à perfuração e completação de poços, os quais podem ser injetores ou produtores, a depender da estratégia de recuperação dos reservatórios adotada pela companhia operadora. Sondas de perfuração de modo geral possuem carteiras de projetos dinâmicas e que

acompanham primordialmente os planos estratégicos e de negócios da companhia operadora, desta forma, existe uma constante mudança de locação para execução de diferentes atividades em diferentes campos de petróleo.



Figura 2.2 – Navio-sonda Ocean Rig Corcovado (Fonte: energynorthern.com)

As unidades de produção por sua vez são unidades tipicamente geoestacionárias, ou seja, seu posicionamento tende a ser fixo durante toda a vida útil do campo de petróleo. Estas plataformas são responsáveis primordialmente pela extração do petróleo e gás natural dos reservatórios e processamento primário dos mesmos. Na Figura 2.2 podemos observar a unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (em inglês *Floating Production Storage and Offloading*, FPSO, como abreviado no mercado de produção de petróleo) Pioneiro de Libra em operação no campo de Mero na Bacia de Santos.



Figura 2.3 – FPSO Pioneiro de Libra (Fonte: odebrecht.com)

Por fim, as embarcações especiais, as quais, conforme mencionado anteriormente, possuem a função de realizar serviços auxiliares para a instalação e manutenção dos sistemas produtivos e auxiliares a produção. Estas embarcações possuem, assim como as sondas de perfuração, carteiras de trabalho dinâmicas. Consequentemente, também possuem alta taxa de movimentação ou troca de locação nas bacias sedimentares de atuação. Dentre os diversos tipos de embarcações especiais, destacam-se: embarcações de apoio ao mergulho (*Diving Support Vessels – DSV*), embarcações de lançamento de linhas (*Pipe Laying Support Vessels – PLSV*), navio de estimulação de poços de petróleo (*Well Stimulation Vessel – WSV*) e navio de pesquisa sísmica (*Research Vessel – RV*). Na Figura 2.4 podemos observar uma destas embarcações especiais.



Figura 2.4 – PLSV Sapura Diamante (Fonte: sapura.com.br)

2.2.2 Embarcações para apoio logístico offshore

Para as atividades de apoio logístico *offshore* uma grande variedade de tipos de embarcações pode ser utilizada, entretanto, no presente estudo serão consideradas apenas embarcações do tipo PSV (*Platform Supply Vessel*), visto serem as embarcações mais utilizadas. Na Figura 2.5 desta seção podemos visualizar a feição destas embarcações.



Figura 2.5 – Embarcação de suprimento do tipo PSV (Fonte: solstad.com)

De acordo com Leite (2012) [6], as embarcações do tipo PSV são especialmente projetadas para operações de carga e descarga no mar, sendo capazes de transportar cargas secas de convés, granéis líquidos e granéis sólidos. Dentre os granéis líquidos usualmente movimentados nesta atividade, podemos destacar a água industrial, combustível (diesel), fluidos de perfuração (olefinas, fluidos sintéticos, salmouras diversas, etc.). Já os granéis sólidos mais transportados seriam a baritina, bentonita, calcário e cimento.

O número de referência ao lado da sigla deste tipo de embarcação de suprimento refere-se à tonelada porte bruto (TPB) de cada uma, ou seja, um PSV 3000 possui um TPB aproximado de 3000 toneladas, assim como um PSV 4500 possui um TPB aproximado de 4500 toneladas. Para este tipo de embarcação de suprimento, os portes mais usuais no Brasil são PSV 1500, PSV 3000 e PSV 4500, sendo atualmente utilizados em maior escala os dois últimos portes mencionados, visto que os campos recentemente descobertos se encontram mais distantes da costa, demandando assim, uma capacidade de transporte maior. Estas embarcações possuem excelente manobrabilidade, uma vez que são dotadas de propulsores de proa e popa, sistemas de controle e sistemas de posicionamento dinâmico. Na Tabela 2.1 é possível observar os valores médios das principais características deste tipo de embarcação.

Tabela 2.1 – Características técnicas de embarcação do tipo PSV - Valores médios

Tipo	PSV 1500	PSV 3000	PSV 4500
Comprimento (m)	66,0	72,2	89,2
Boca (m)	12,0	16,4	18,3
Calado máximo (m)	4,1	5,9	6,3
Deslocamento máximo (t)	2300	5051	7462
Peso leve (t)	900	1975	2975
Porte bruto (t)	1400	3106	4475
Comprimento convés (m)	40,2	45,2	58,7
Largura convés (m)	9,0	13,4	15,0
Área de convés total (m ²)	360	572	879
Área de convés útil 70% (m ²)	252	400	615
Resistência de convés (t/m ²)	3,0	5,0	5,0
Carga máxima convés (t)	500	1172	1965

Como referência para o leitor, na Tabela 2.2 são apresentados as médias históricas das velocidades típicas deste tipo de embarcações ao longo do ano de 2017. A tabela em si está dividida em duas colunas, uma para embarcações que possuem capacidade técnica para navegarem a uma velocidade de serviço igual a 10 nós e outra para as que possuem capacidade técnica para navegarem a 13 nós. Estas médias foram calculadas com base em 2.133 amostras obtidas através de sistema de georreferenciamento e rastreamento de embarcações em operação em um caso real da indústria do petróleo no Atlântico Sul, sendo que cada amostra de velocidade foi medida no percurso compreendido entre a base portuária de origem até a primeira unidade marítima do roteiro da embarcação e no percurso compreendido entre a última unidade marítima do roteiro até o porto de origem.

Tabela 2.2 – Velocidades de navegação para embarcações do tipo PSV

Velocidade de serviço (nós)	10,0	13,0
Janeiro	9,0	11,0
Fevereiro	9,3	11,6
Março	9,4	12,0
Abril	9,4	11,5
Maio	9,5	11,7
Junho	9,6	12,1
Julho	9,4	12,1
Agosto	9,6	12,1
Setembro	9,3	11,5
Outubro	9,4	11,7
Novembro	9,5	11,7
Dezembro	9,1	11,9

2.2.3 Ciclo de atendimento logístico – modal marítimo

Esta seção tem por objetivo prover ao leitor informações mínimas referentes ao ciclo de atendimento de uma embarcação de suprimento a um agrupamento ou *cluster* de plataformas *offshore*.

Primeiramente, vale esclarecer que usualmente as plataformas *offshore* são agrupadas a partir de alguns critérios, sejam eles: tipo de operação que realizam (perfuração, produção ou serviços auxiliares), dispersão geográfica e demanda de carga. Dessa forma, os *clusters* são formados com plataformas ou embarcações do mesmo tipo e finalidade produtiva, com localização relativamente próximas, sendo o quantitativo de unidades marítimas de cada agrupamento limitado à demanda de carga do *cluster* como um todo. Somado a isto, a frequência de atendimentos ou visitas de embarcações também é definida com base na demanda de carga destas unidades. Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito estocástico das demandas extemporâneas das plataformas clientes durante a execução de um atendimento ou ciclo isolado de uma única embarcação, dados relacionados a dimensionamento de frota, formação de *clusters* e etc. não serão contemplados nesta seção.

Dito isto, cada ciclo de atendimento possui etapas bem definidas, sejam elas: tempo de fundeio, operação portuária, navegação, operação com as plataformas clientes e possivelmente períodos de aguardo. Estas etapas podem ser melhor visualizadas na Figura 2.6. Note que para cada uma das etapas existe um marcador verde ou vermelho. Estes marcadores têm por objetivo diferenciar cada período do ciclo da embarcação como um período produtivo ou então não produtivo. Períodos não produtivos são os que a embarcação de suprimento está de certa forma ociosa, sem gerar um resultado positivo para a companhia. Estes são os períodos que devem ser atacados primordialmente visando minimiza-los para que assim seja possível aumentar a produtividade ou eficiência da frota como um todo de embarcações de apoio *offshore*.

Entretanto, o efeito estocástico das demandas extemporâneas das plataformas clientes, foco deste trabalho, pode ficar disfarçado quando segregamos as atividades da embarcação de suprimento entre as etapas mencionadas em cada ciclo de atendimento realizado. Isto ocorre, pois, a partir do momento que as solicitações

extemporâneas são realizadas e incorporadas na rota da embarcação de suprimento, pode haver a necessidade desta embarcação não realizar a melhor rota do ponto de vista da distância total navegada ou ainda precise passar por uma mesma plataforma mais de uma vez na mesma viagem, aumentando assim o tempo total do ciclo. Este disfarce na improdutividade da operação ocorre, pois, períodos de navegação em rotas não otimizadas e operações quebradas em duas ou mais vezes em um mesmo ciclo para uma mesma plataforma continuam a ser enxergados em um primeiro momento como tempos produtivos, uma vez que a embarcação não está de fato ociosa.

Adicionalmente, para melhor interpretação da imagem abaixo, vale mencionar que as etapas de carga e descarga de materiais seja no porto ou em uma unidade marítima também são conhecidas como operações de *load* e *backload* respectivamente. As etapas nomeadas como “posicionamento dinâmico” nada mais são que os períodos necessários para a embarcação de suprimento se aproximar e afastar da unidade marítima com a qual operará.

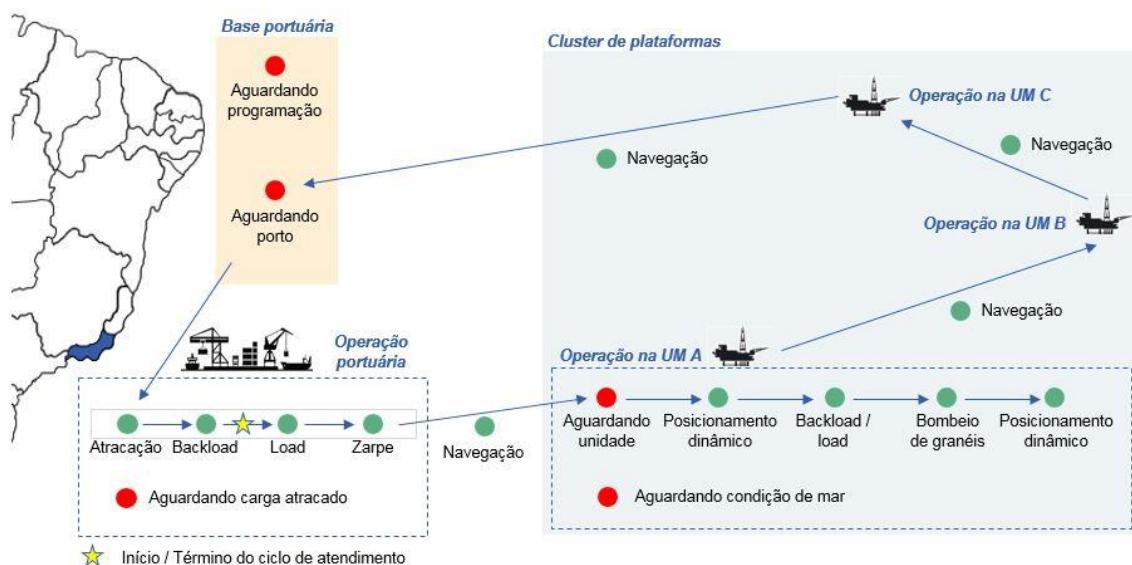


Figura 2.6 – Ciclo de atendimento a um agrupamento de plataformas clientes (Fonte: imagem elaborada pelo autor)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura acadêmica tem revelado um interesse crescente em problemas relacionados à logística marítima como um todo com foco principalmente nos problemas relacionados a política de atendimento às unidades marítimas, tipos de carga demandadas, programação, roteamento e dimensionamento de frotas. Contudo, embora haja modelos matemáticos aprimorados e algoritmos de otimização desenvolvidos para suportar a tomada de decisões nestes aspectos, poucas publicações demonstram aplicações de sucesso para casos da vida real. Adicionalmente, poucas publicações versam sobre possíveis interferências externas ao processo de programação de embarcações, interferências estas que existem nas aplicações reais da indústria de óleo e gás e causam distúrbios de difícil controle ou padronização.

Posto isto, este capítulo tem por objetivo descrever e indicar as principais abordagens de soluções encontradas na literatura para os aspectos citados no parágrafo anterior.

Dentre a bibliografia avaliada, o estudo mais próximo encontrado do objetivo deste trabalho é o de Aas et al. [7]. Nesta publicação de 2007 os autores estudam o problema de roteamento de uma única embarcação responsável pela coleta e entrega de materiais diversos a plataformas *offshore* (SVRPPD – *Single Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery*). Além da avaliação da rota, o estudo considera também as restrições de capacidade de cada plataforma cliente. O modelo proposto é determinístico e permite duas visitas em momentos distintos para alguns clientes, de forma que as cargas provenientes de terra sejam entregues em uma primeira visita e as cargas de retorno sejam coletadas em uma segunda visita. Os autores utilizaram o software CPLEX para minimizar a função objetivo do problema, no caso os custos, situação bem similar a proposta para esta dissertação. Na publicação de Gribkovskaia et al. [8] de 2014 o problema considerado é similar ao dos autores anteriores, de forma

que ambos os artigos servirão de base para o modelo proposto mais à frente neste trabalho.

Em um segundo trabalho de Aas et al. [9], este publicado em 2009, o papel das embarcações do tipo PSV no transporte marítimo de cargas *offshore* foi analisado perante quatro quesitos principais, sejam eles: confiabilidade operacional, capacidade de carregamento por tipo e quantidade de carga, naveabilidade e eficiência nas operações de carregamento e descarregamento. Para este último quesito, Schneekluth e Bertram [10] expõem em 1998 que o maior desafio das operações logísticas de uma embarcação de suprimento está justamente nas operações *offshore* junto as plataformas e não nas operações portuárias como tradicionalmente é pensado.

Do ponto de vista da política de atendimento às plataformas *offshore*, Aas et al. [11] discorrem em 2008 sobre um estudo de caso ocorrido na Noruega relacionado à terceirização das operações logísticas. Resumidamente, os autores notaram um despreparo por parte das pessoas que trabalhavam com logística no gerenciamento da cadeia de suprimentos, bem como, um atraso tecnológico quando analisaram as ferramentas de planejamento e gestão utilizadas. De modo geral, a percepção dos autores é que a real importância não era dada às atividades logísticas, possivelmente por esta atividade ser secundária quando comparada a atividade fim da companhia operadora analisada. Ainda sobre este assunto, Agra [2] em 2018 argumenta que essa despriorizações do setor dentro da indústria de óleo e gás era similar no cenário brasileiro até poucos anos atrás.

Com relação ao planejamento e programação das atividades logísticas, Aas e Wallace [12] relatam em 2008 que um melhor gerenciamento destes itens poderia resultar em um aumento no nível do serviço, minimizando os desperdícios durante a execução destas atividades. O grande entrave, contudo, é que os custos logísticos eram na época do estudo muito ínfimos quando comparados aos custos operacionais ou os lucros cessantes de uma plataforma *offshore* com operações interrompidas, tornando

assim qualquer gasto com logística justificável na época. Para este assunto em específico, podemos também fazer uma correlação com o cenário brasileiro. No início de 2016 com a redução significativa do preço do barril de petróleo no mercado mundial, chegando a um patamar mais baixo que o fundo alcançado na crise de 2008, fez-se necessário que as empresas do ramo de óleo e gás repensassem a gestão de seus gastos, tendo como desdobramento uma melhora significativa na disciplina de planejamento e execução operacional em diversas áreas assim como na logística.

Outro estudo que talvez se aproxime da proposta deste trabalho é o de Albjerk et al. [13] de 2015. Nesta dissertação trata-se da política de planejamento operacional e gerenciamento de interrupções dos serviços logístico no Mar do Norte em um caso específico da Statoil. Os autores citam que estas interrupções são causadas principalmente devido as condições climáticas adversas, solicitações inesperadas ou não planejadas vindas das plataformas *offshore* e incertezas nas quantidades dos materiais solicitados. Para tanto os autores propuseram uma heurística VNS (*Variable Neighbourhood Search*) para solução de instâncias reais que os modelos computacionais usuais não são capazes de responder dentro de um tempo razoável de tempo.

Fagerholt et al. [14] descrevem por sua vez em publicação no ano 2000 cenários de redução de custos avaliando os impactos de se ter algumas ou todas instalações *offshore* na plataforma continental norueguesa fechadas para recebimento de embarcações de suprimento durante o período noturno, assim como políticas para determinar roteamentos ótimos destas embarcações.

Halvorsen-Weare et al. [15] em 2011 apresentaram um método para solução do problema de roteamento de embarcações de suprimento e composição de frota. Este modelo determina a priori a rota que cada embarcação deve realizar com base em todas as viagens que devem ser realizadas. Em um segundo estudo [16] publicado em 2012 os mesmos autores abordam o mesmo problema, mas desta vez determinando

parâmetros que permitam a criação de cronogramas mais robustos. E por fim, em uma última publicação em 2016 [17] o modelo previamente estudado é expandido, levando agora em consideração as condições meteoceanográficas existentes na costa norueguesa, as quais podem ser muito restritivas, acarretando em perdas operacionais, tais como: limitação na velocidade de navegação das embarcações e aumento no tempo para transferência das cargas entre embarcações e plataformas. Todos estes estudos foram conduzidos em conjunto com a Statoil, principal operador na plataforma continental norueguesa.

Fagerholt [18] considerou em sua publicação de 2001 um problema real para definição da programação das embarcações com base em janelas flexíveis. A motivação para consideração de janelas flexíveis em detrimento às janelas fixas está atrelada a obtenção de melhores cronogramas e consequente redução de custos de transporte, tendo em vista o não cumprimento das janelas fixas por alguns clientes. De certa forma, podemos entender que há uma correlação deste estudo com o que se busca nesta dissertação, visto que a intenção primordial é dar solução para demandas extemporâneas apresentadas pelas plataformas clientes em momentos diversos.

Borthen e Loennechen [19] em 2016 forneceram uma formulação e solução do problema de planejamento da embarcação de suprimento, a fim de obter um custo operacional robusto e persistentemente menor considerando eventos imprevistos tais como atrasos diversos.

Dulai et al. (2018) [20] apresenta um novo algoritmo para resolver problemas de roteamento de um único veículo considerando sua capacidade de uma maneira tolerante a possíveis falhas ou indisponibilidades. Para tanto, considera-se que outros veículos possam assumir a missão inacabada do primeiro veículo.

De acordo com Valente et al. (2008) [21], problemas relacionados ao transporte de cargas para plataformas *offshore* possuem dois níveis de solução, um de planejamento e projeto do sistema e outro operacional. Na fase de planejamento, cada

empresa pode trabalhar com cálculos simples e estimativas grosseiras. Entretanto, a partir do momento que determinados parâmetros passam a ter grandes variações quando comparado às médias, os efeitos randômicos precisam ser levados em consideração.

A formulação matemática para o SDVRP a ser apresentada mais à frente na seção 5 segue primordialmente as abordagens de Ulmer et al. Na publicação de 2016 [22] os autores afirmam que provedores de serviços logísticos nas grandes cidades precisam muitas vezes decidir sob incerteza, visto que em alguns casos nem todos os clientes ou demandas são conhecidas no momento da decisão e propõem um algoritmo para maximizar o número de solicitações atendidas em relação a um limite de tempo. A proposta de modo geral é incorporar as solicitações estocásticas dos clientes de forma dinâmica com tomadas de decisões no momento que o veículo chega a cada um dos clientes previstos na rota imediatamente antes planejada. Em 2017, no livro referenciado em [23] escrito por Ulmer é possível encontrar detalhes acerca de um modelo de roteamento baseado nos processos markovianos de decisão, em inglês conhecido também como *Markov Decision Process* (MDP). Este modelo considera que um conjunto de clientes geograficamente dispersos precisam ser visitados por um ou mais veículos e que as informações mudam estocasticamente, existindo oportunidades para tomada de decisões em resposta a novas informações para adequação e maximização do nível de serviço e minimização dos custos. Já na publicação referenciada em [24] também de 2017, Ulmer et al. alegam que desenvolver sistemas de apoio à decisão, utilizando informação em tempo real, com a qualidade adequada e no momento certo, a fim de melhorar a qualidade do planejamento e serviço é um desafio. Somado a isto, os autores refletem acerca do momento que replanejamentos devem ser realizados, uma vez que com informações sendo fornecidas em tempo real tais replanejamentos podem ocorrer a qualquer momento. Por fim, na publicação de 2018 referenciada em [25] Ulmer et al. defendem que em aplicações práticas, como serviços de encomendas

ou técnicos, os clientes solicitam serviços ao longo do dia e que a decisão por aceitar um cliente para o mesmo dia ou adiar para o próximo é único e exclusiva do provedor do serviço, o qual toma tais decisões com base na disponibilidade ou limitações de recursos. Entretanto, tais decisões afetam não só o desempenho no dia corrente, mas também no dia seguinte. O mesmo ocorre na logística *upstream* da indústria de óleo e gás. Decisões inadequadas relacionadas à aceitação dos pedidos randômicos das plataformas *offshore* influenciarão diretamente não só na capacidade de atendimento do dia posterior, mas também, em muitos casos, na continuidade operacional da unidade marítima demandante.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nesse capítulo o problema será declarado em detalhes para o leitor, assim como algumas proposições simplificadoras serão estabelecidas de forma a limitar o escopo do trabalho.

4.1 Declaração do problema

O problema aqui descrito pertence ao clássico problema de pesquisa operacional relacionado ao roteamento de veículos, no qual as embarcações de suprimento são equivalentes aos veículos de fato e as plataformas *offshore* aos clientes. Em inglês este problema é conhecido como *Vehicle Routing Problem (VRP)*.

Conforme exposto anteriormente, para que os diferentes tipos de unidades marítimas utilizadas nas atividades de E&P na indústria de óleo e gás consigam desenvolver as atividades para as quais foram destacadas, faz-se necessário um suporte logístico robusto, de forma a garantir um nível de serviço adequado, evitando assim descontinuidades operacionais e consequentemente prejuízos financeiros à companhia operadora. Por este motivo o problema considerado neste trabalho está focado primordialmente no roteamento de embarcações de suprimento empregadas nestas atividades, ou seja, o problema versa sobre o roteamento de embarcações de suprimento que partem de uma base portuária específica com a missão de proverem serviços logísticos a um agrupamento de plataformas *offshore*, retornando à mesma base portuária após isto.

Vale comentar que o problema de roteamento de embarcações é formulado e resolvido em momento posterior à solução de outro problema, que no caso seria o de dimensionamento e alocação de frota com base nas atividades ou demandas existentes. O dimensionamento e alocação de frota dependem prioritariamente da política de atendimento logístico praticada pela companhia operadora, sendo que esta política

usualmente leva em consideração os perfis operacionais das unidades marítimas clientes, geolocalização ou dispersão geográfica destas mesmas unidades e também a demanda por tipo e quantidade de cargas.

De forma macro, para execução de um atendimento logístico no modal marítimo a um grupo de plataformas *offshore* destaca-se primeiramente uma embarcação de suprimento na frota disponível que possua as características técnicas necessárias para o transporte das cargas demandadas. Feito isto, esta embarcação é direcionada ao terminal portuário, no qual é carregada com as cargas que transportará até as diversas plataformas clientes. Após a operação de carregamento, a embarcação inicia a viagem com destino ao agrupamento de plataformas, tendo como função entregar as cargas recebidas no terminal portuário e receber das plataformas clientes as cargas que devem retornar para terra. Cada uma destas viagens é iniciada e finalizada no mesmo local, ou seja, no mesmo terminal portuário, buscando-se obviamente realizar o ciclo de atendimento no menor tempo possível, otimizando assim a frota e minimizando os custos operacionais.

Feito esta contextualização, considere agora que, em algum momento após o zarpe da embarcação do porto de origem, ou seja, durante a navegação ou operação desta embarcação com uma das plataformas clientes designadas, uma demanda randômica e não prevista surge para uma destas plataformas de forma que para mitigar qualquer descontinuidade operacional tal demanda precisa ser incluída no planejamento original de atendimento elaborado para a embarcação quando ainda estava atracada na base portuária. Estes pedidos são considerados randômicos, pois, para atendimento a estas demandas, diferentes adequações na rota da embarcação podem ser necessárias de modo que o resultado final seja satisfatório. Os fatores ou motivos que geram estes pedidos randômicos ou solicitações aleatórias estão relacionadas a instabilidades ou indisponibilidades operacionais de equipamentos críticos, descolamento das atividades executadas pela unidade marítima quando comparado às atividades planejadas,

alterações de curto prazo no cronograma de atividades atrelados a modificações estratégicas de uso de outros recursos pela companhia operadora e assim por diante.

Dessa forma, podemos então definir que as diferentes demandas das plataformas clientes podem ser divididas e tratadas basicamente através de dois tipos de solicitações de serviço, sejam elas: solicitações de serviço planejadas (*Planned Service Request - PSR*) e solicitações aleatórias de serviço adicionais (*Random Service Request - RSR*). Em quanto as solicitações do tipo PSR ocorrem em antecedência ao zarpe da embarcação do porto de origem e possuem parametrização de execução obrigatória durante o atendimento logístico às plataformas, as solicitações do tipo RSR são feitas após o zarpe da embarcação do porto de origem, ou seja, durante o atendimento logístico, fato que caracteriza estes pedidos como randômicos e opcionais, uma vez que as plataformas *offshore* como clientes podem ou não demandar tais adequações no atendimento logístico. Vale ressaltar, entretanto, que uma vez incluída uma RSR no roteiro de uma embarcação, a execução desta torna-se mandatória.

Em adição ao exposto acima, podemos ainda subdividir uma RSR em duas outras classes considerando a criticidade da demanda imposta pelo cliente, as quais seriam: solicitação de serviço aleatório prioritário (*Priority Random Service Request - PRSR*) e solicitação de serviço aleatório não prioritário (*Non-priority Random Service Request - NRSR*). Simplificadamente, quando falamos de uma PRSR significa dizer que a plataforma cliente que realizou tal solicitação deverá ser colocada no topo da lista de plataformas *offshore* a serem visitadas. Isto é, todo o planejamento e roteamento previamente realizado para o atendimento das plataformas deve ser revisto considerando esta nova restrição prioritária. Uma PRSR usualmente substitui uma PSR quando esta não mais atende à necessidade inicial da plataforma, sugerindo um caráter de urgência na adequação do atendimento logístico em andamento de forma a minimizar potenciais impactos operacionais. Cabe ainda observar que no momento em que a PRSR é requerida, caso a plataforma demandante ainda não tenha tido sua PSR

executada, esta visita deixa de existir no planejamento como um todo, de modo que a embarcação ao ser desviada de sua rota original para o atendimento da PRSR já execute todo o serviço planejado. Em outras palavras, uma plataforma *offshore* continua sendo visitada uma única vez, mas de forma prioritária. Para o caso em que a PSR já tenha sido executada e uma PRSR seja solicitada, a plataforma demandante também será atendida de forma prioritária, contudo, para este caso em específico haverá uma segunda visita durante a mesma viagem da embarcação de suprimento. Seguindo nesta mesma linha de raciocínio, a demanda por uma NRSR significa dizer que a plataforma requisitante precisa ser visitada uma segunda vez em momentos distintos durante o ciclo de atendimento logístico da embarcação de suprimento devido a algum motivo operacional, tal como a necessidade de receber algum material temporariamente e desembarca-lo em um curtíssimo prazo de tempo.

Isto posto, podemos determinar que para cada RSR requisitado, o roteamento da embarcação de suprimento precisa ser revisado de modo a se obter um novo percurso otimizado do ponto de vista da distância a ser percorrida, mantendo obviamente as visitas do tipo PSR e RSR ainda pendentes de serem executadas.

4.2 Proposições simplificadoras

De modo a facilitar a modelagem do problema e análise dos resultados, as seguintes simplificações serão consideradas na formulação do modelo:

1. O estudo abrangerá apenas as plataformas de produção de um caso real da indústria na plataforma sul do Oceano Atlântico uma vez que estas unidades são geoestacionárias e assim as posições e distâncias são parâmetros conhecidos e imutáveis ao longo do tempo. Sondas e embarcações especiais conforme visto na seção 2.2.1 não possuem esta característica;

2. O tempo de movimentação e transferência de cargas é um parâmetro estocástico, visto variar de acordo com a quantidade de carga demandada por cada plataforma. Este tempo não será objeto de análise no referido estudo, ou seja, será considerado como instantâneo;
3. Tempos de aguardo ou *stand-by* também são parâmetros estocásticos e desta forma também serão desconsiderados.

Dante das premissas explicitadas acima, podemos facilmente determinar que a função objetivo a ser minimizada de tal maneira que certas restrições sejam obedecidas é a da distância total ser percorrida pela embarcação de suprimento a cada atendimento ou ciclo logístico realizado.

5 MODELO MATEMÁTICO

A formulação matemática aqui apresentada para o problema em consideração neste documento é uma variante do problema estocástico de roteamento dinâmico de veículos (*Stochastic Dynamic Vehicle Routing Problem - SDVRP*) para o qual uma visão ampla e geral pode ser encontrada nas abordagens de Ulmer et al. referenciadas em [22], [23], [24] e [25].

5.1 Modelo de roteamento markoviano baseado em decisão

Em linhas gerais, o modelo de roteamento aqui proposto é um problema estocástico de roteamento dinâmico de embarcações, o qual é caracterizado pelos seguintes fatores:

- Ponto de decisão: instante no tempo em que uma decisão é tomada. No modelo proposto neste documento as decisões são tomadas preferencialmente no momento em que a embarcação de suprimento se encontra em uma plataforma *offshore* específica;
- Estado: conjunto de condições e informações necessárias para definir ações viáveis em um determinado momento ou ponto de decisão. Estas informações são basicamente o instante de tempo, a localização da embarcação, da plataforma que está sendo servida e, por fim, a lista de plataformas clientes pendentes de serem visitadas, sejam visitas do tipo PSR ou RSR;
- Decisão: é o efeito de uma ação que resulta na transição entre estados, ou seja, a partir de opções factíveis e disponíveis para um estado particular, decisões podem ser tomadas, resultando em um determinado custo, seja ele positivo (ganho) ou negativo (perda). Ilustrativamente podemos dizer que a solicitação de uma PSR ou RSR por uma plataforma cliente em um

determinado momento é uma ação que possui como resultado um custo definido e a alteração do estado inicial;

- Custo: resultado de uma ação específica após sua execução. Para o presente estudo, o incremento ou diminuição da distância percorrida pela embarcação é o custo de cada ação executada;
- Transição: função que descreve como o sistema evolui diante das ações escolhidas e executadas a partir de um determinado estado particular;
- Objetivo: é uma função dos custos, a qual no caso em estudo envolve a minimização da soma dos custos esperados em todos os pontos de decisão.

Cabe destacar que o termo “custo” utilizado nesta seção é referente ao valor final da função objetivo, a qual será definida no item 6.5.3 deste trabalho.

5.2 Exemplos ilustrativos

Com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão do modo como o modelo proposto pode ser aplicado em situações reais, dois exemplos ilustrativos são apresentados na sequência.

5.2.1 Exemplo de pedido de serviço aleatório prioritário (PRSR)

Neste primeiro exemplo, suponha que a embarcação de suprimento deixa a base portuária denotada pelo nó “0” na Figura 5.1 com um roteamento inicial otimizado (apenas com visitas do tipo PSR) representado pela lista 0 – 4 – 2 – 5 – 1 – 3 – 0, tal como no quadro mais à esquerda da mesma figura. Adicionalmente, suponha que após a chegada da embarcação de suprimento na plataforma cliente número 4 e atendimento da PSR desta mesma plataforma, uma PRSR é requerida pela plataforma número 3. Lembre-se que neste momento as visitas do tipo PSR das plataformas de número 1, 2,

3 e 5 ainda estão pendentes de serem executadas. O sistema encontra-se no estado de pré-decisão S_k e o instante de tempo é o t_k , sendo k o seu subscrito.

Recebido o pedido por uma PRSR da plataforma número 3, uma x_k favorável ao atendimento da solicitação é tomada e o sistema é movido para um estado de pós-decisão S_k^x , o qual é demonstrado através do quadro central da Figura 5.1. Nesta etapa é avaliado a necessidade de se incluir visitas adicionais ao atendimento da embarcação de suprimento de forma a atender a todas as requisições, as iniciais e as novas. Tendo em vista que a plataforma número 3 solicitou uma PRSR antes de ter sua PSR servida, para atendimento desta requisição de forma imediata a rota da embarcação de suprimento é desviada para a plataforma requerente sem a necessidade de incluir visitas adicionais às já previstas no plano original. Dessa forma, podemos observar que neste estado de pós-decisão S_k^x o planejamento ou roteamento inicial da embarcação de suprimento é deixado de lado e a embarcação de suprimento é direcionada imediatamente para a plataforma demandante. Este direcionamento é ilustrado no quadro central da Figura 5.1 através da linha continua que liga as plataformas 4 e 3.

Feito isto, uma transição estocástica w_{k+1} move o sistema do estado de pós-decisão S_k^x para um novo estado de pré-decisão S_{k+1} , o qual pode ser observado no quadro mais à direita também da Figura 5.1. Observe que neste novo estado de pré-decisão S_{k+1} uma nova rota é planejada de modo que as demais plataformas tenham suas visitas do tipo PSR executadas, no caso as plataformas 1, 2 e 5. Vale lembrar que o objetivo primordial é a minimização dos custos e dessa forma a nova rota é determinada minimizando a distância total a ser ainda percorrida pela embarcação. Podemos ainda considerar que neste estado uma ação de re-roteamento foi executada e que o custo desta ação foi adicionado ao custo total da viagem da embarcação de suprimento.

Por fim, este procedimento em duas etapas é então repetido indefinidamente até que a embarcação de suprimento execute todas as visitas inicialmente planejadas, as

requeridas ao longo da viagem e então retorne ao nó inicial “0”, que representa a base portuária.

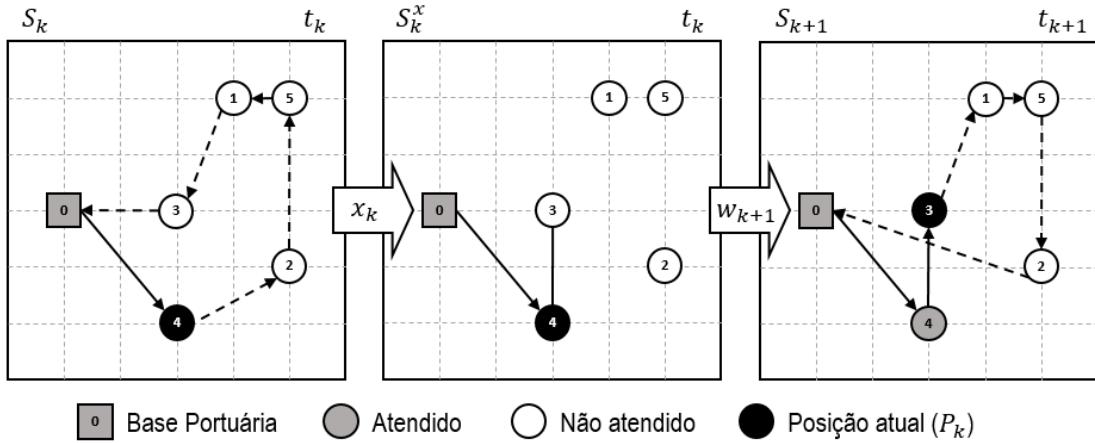


Figura 5.1 – Exemplo de PRSR

5.2.2 Exemplo de pedido de serviço aleatório não prioritário (NRSR)

Seguindo o mesmo objetivo do exemplo da seção 5.2.1, um segundo exemplo ilustrativo é apresentado, mas desta vez para um pedido de serviço aleatório não prioritário (NRSR).

Posto isto, considere a mesma situação do exemplo anterior, em que a embarcação de suprimento deixa a base portuária denotada pelo nó “0” com o roteamento inicial otimizado (apenas com visitas do tipo PSR) representado pela lista 0 – 4 – 2 – 5 – 1 – 3 – 0, tal como mostrado no quadro mais à esquerda da Figura 5.2.

O sistema neste momento está no estado de pré-decisão S_k e instante de tempo t_k . Diante do fato de nenhuma RSR ter sido identificada após a plataforma 4 ter sido servida pela embarcação de suprimento, uma decisão x_k é tomada e o sistema é movido para o estado de pós-decisão S_k^x , no qual a embarcação de suprimento é direcionada pra a plataforma seguinte que no caso é a de número 2 de acordo com o roteamento previamente definido. Este estado é representado no quadro intermediário da Figura 5.2 através da linha continua que liga as plataformas 4 e 2.

Após isto, uma transição estocástica w_{k+1} move então o sistema do estado de pós-decisão S_k^x para um novo estado de pré-decisão S_{k+1} , o qual pode ser observado no quadro mais à direita também da Figura 5.2. Note que neste novo estado de pré-decisão S_{k+1} a posição P_k da embarcação de suprimento é justamente a plataforma número 2 e que a sua rota permanece inalterada quando comparada a rota existente no estado S_k . Isto acontece devido a inexistência de solicitações que causassem distúrbios no planejamento inicial, podendo assim a rota inicial ser mantida.

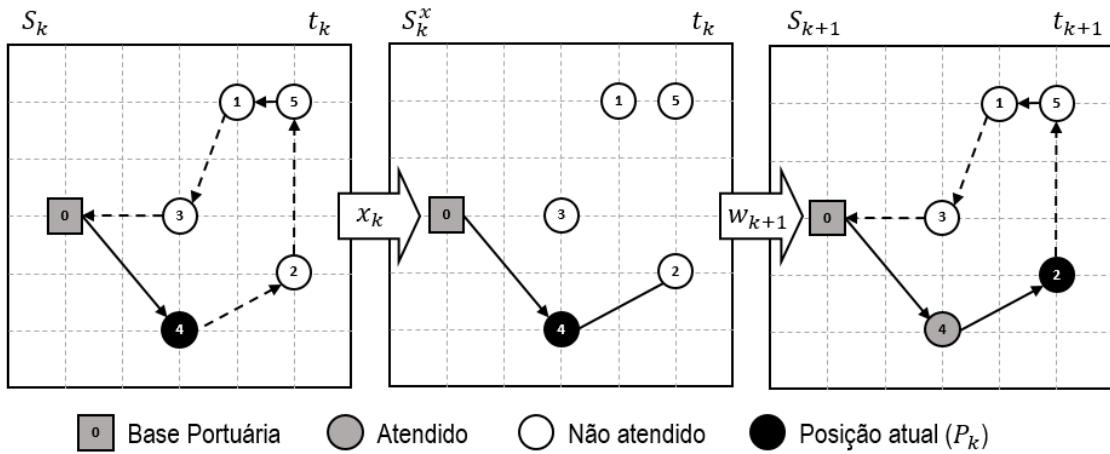


Figura 5.2 – Exemplo de NRSR – Parte 1

Finalizada esta primeira parte do exemplo, agora o sistema está em um novo estado de pré-decisão denominado S_{k+1} e instante de tempo t_{k+1} conforme quadro mais à esquerda da Figura 5.3. Neste instante de tempo a plataforma número 4 já foi atendida e a embarcação de suprimento foi movida para atendimento da PSR da plataforma número 2.

Suponha então que no instante de tempo t_{k+1} ao final do atendimento da PSR da plataforma número 2 seja identificado uma solicitação por uma NRSR feita pela plataforma número 1. Importante citar que as visitas do tipo PSR das plataformas 1, 3 e 5 permanecem ainda pendentes.

Dante desta nova informação, novamente o procedimento em duas etapas é executado de forma que uma decisão x_{k+1} favorável ao atendimento da solicitação da

plataforma número 1 é tomada e o sistema é movido para um estado de pós-decisão S_{k+1}^x . Neste estado é possível observar que a NRSR requerida pela plataforma número 1 já é representada por uma segunda visita conforme quadro central da Figura 5.3. Isto ocorre, pois quando uma NRSR é demandada por uma plataforma significa dizer que esta necessita ser visitada duas vezes em momentos distintos durante o ciclo da embarcação de suprimento, resultando assim na necessidade de adicionar uma nova parada na rota do atendimento como um todo.

Após isto, uma transição estocástica w_{k+2} move o sistema do estado de pós-decisão S_{k+1}^x para o novo estado de pré-decisão S_{k+2} , o qual é mostrado no quadro da direita da Figura 5.3. Note que neste novo estado de pré-decisão S_{k+2} uma nova rota é planejada contemplando as visitas do tipo PSR ainda não executadas e também a visita do tipo NRSR solicitada pela plataforma número 1. Neste momento o custo também é adicionado ao custo total da viagem.

A partir de agora, o procedimento em duas etapas é repetido indefinidamente até que a embarcação retorne ao seu ponto de origem, no caso a base portuária.

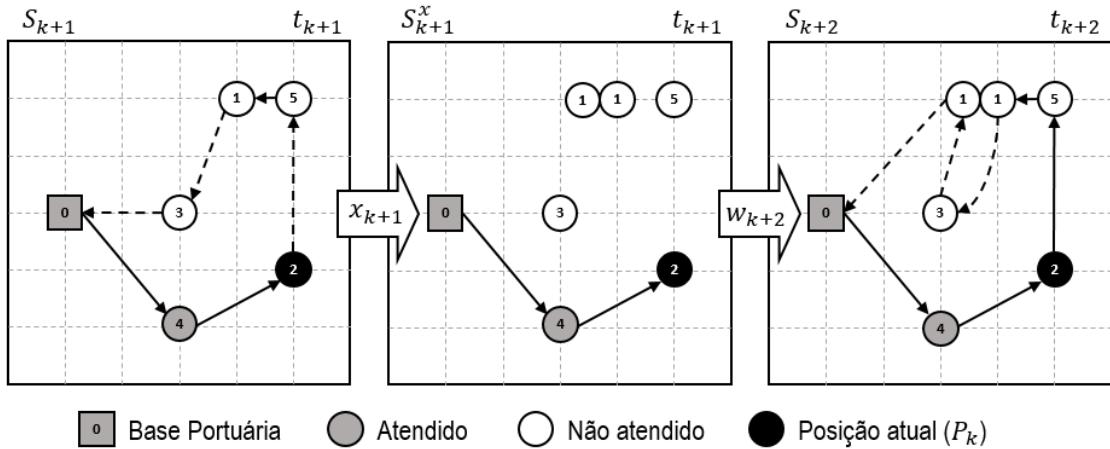


Figura 5.3 – Exemplo de NRSR – Parte 2

6 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

A busca por soluções para problemas práticos e estudos de caso do mundo real demanda a aplicação de heurísticas diversas. A heurística desenvolvida neste trabalho faz uso dos seguintes recursos do problema em consideração, conforme descrito na seção 2.

1. O número de plataformas clientes é um número inteiro e invariável no tempo finito conhecido;
2. Em uma determinada viagem da embarcação, cada plataforma cliente possui o direito a uma PSR;
3. Em uma determinada viagem da embarcação, cada plataforma cliente pode solicitar uma RSR.

A heurística adotada é a de reotimização em tempo real, na qual o problema do caixeiro-viajante (*Travel Sales Problem - TSP*) é resolvido toda vez que um novo RSR é requisitado por uma plataforma cliente.

6.1 Fluxo lógico do processo

Nesta seção é definido um fluxograma, no qual é possível visualizar o sequenciamento lógico para solução do problema em duas etapas. Esse sequenciamento segue basicamente as premissas definidas abaixo e podem ser melhor visualizadas na Figura 6.1.

1. Uma rota inicial e ideal para o veículo é determinada antes de sua partida da origem. Esta rota será conhecida como planejada e suas visitas como regulares, ou seja, existirão apenas visitas do tipo PSR neste primeiro momento;
2. A cada escala da embarcação de suprimento ou plataforma visitada, as informações são revisadas de forma a avaliar se há novas solicitações que

demandem um novo roteamento, ou seja, é avaliado se foram solicitadas visitas do tipo PRSR ou NRSR;

3. A rota ideal da embarcação de suprimento é então atualizada, se necessário, e o processo continua até que todas as visitas do tipo PSR e RSR sejam executadas;
4. Após isto a embarcação de suprimento retorna a origem ou base portuária.

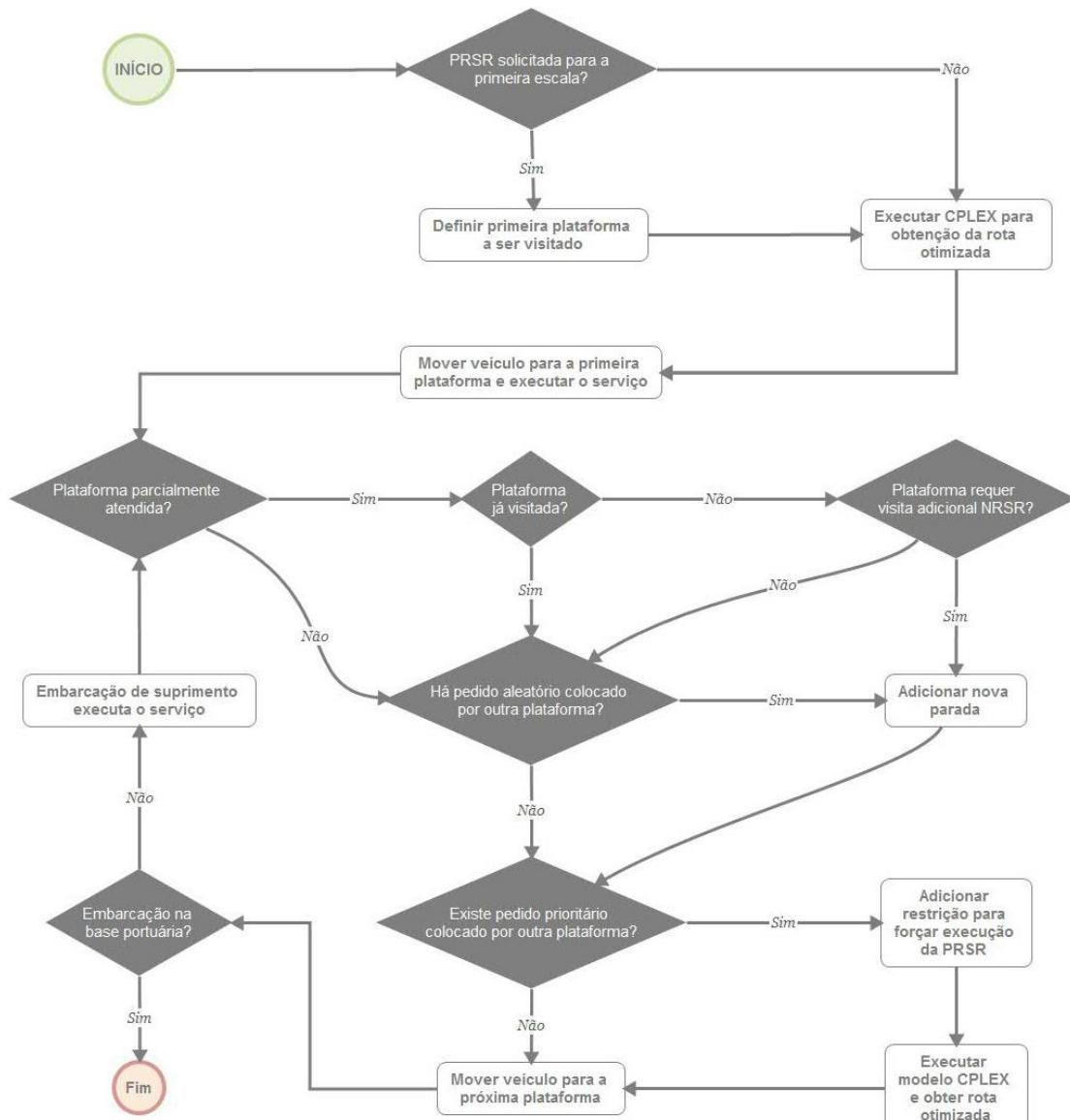


Figura 6.1 – Fluxograma (sequenciamento lógico das etapas)

6.2 Notação matemática

A notação apresentada abaixo será utilizada tanto na demonstração do algoritmo computacional de reotimização da seção 6.3 e 6.4, como também no modelo de programação linear inteira mista da seção 6.5.

i - Subscrito da posição de origem no instante de tempo t_k . $\forall i = 1, 2, \dots, I$;

j - Subscrito da posição de destino no instante de tempo t_k . $\forall j = 1, 2, \dots, J$;

k - Subscrito para o instante de tempo;

$A_{i,k}, A_{j,k}$ - Lista de visitas regulares (PSR) no instante k ;

$B_{i,k}, B_{j,k}$ - Lista de visitas aleatórias (RSR) no instante k ;

$a_{i,k}, a_{j,k}$ - Cliente na lista A;

$b_{i,k}, b_{j,k}$ - Cliente na lista B;

6.3 Algoritmo computacional de reotimização

Para implementar o algoritmo computacional de reotimização em duas etapas, duas listas são criadas e denominadas como lista A e lista B.

As informações relativas as visitas do tipo PSR ficam armazenadas na lista A e são constituídas por elementos $a_{i,k}$, onde $i = 1, 2, \dots, I$ e $k = 1, 2, \dots, K$; sendo I o número de plataformas cliente e k o instante de tempo. Já as visitas do tipo RSR ficam armazenadas na lista B e são constituída pelos elementos $b_{i,k}$, onde $i = 1, 2, \dots, I$ e $k = 1, 2, \dots, K$. Os elementos $a_{i,k}$ e $b_{i,k}$ serão iguais a zero se no instante de tempo k a plataforma cliente i não tiver visitas do tipo PSR e RSR respectivamente planejadas nas listas. Seguindo na mesma linha, os elementos $a_{i,k}$ e $b_{i,k}$ serão iguais a 1 se a

plataforma cliente i tiver no instante de tempo k visitas do tipo PSR e RSR respectivamente planejadas nas listas.

Importante reforçar que elementos $a_{i,k}$ e $b_{i,k}$ das listas $A_{i,k}$ e $B_{i,k}$ respectivamente representam a mesma plataforma cliente no instante de tempo k , ou seja, possuem a mesma posição física no sistema, sendo utilizadas apenas para diferenciação do tipo de visita ou solicitação.

6.4 Pseudocódigo

De forma a clarificar a dinâmica do algoritmo computacional proposto, nesta seção são apresentados pseudocódigos de forma a facilitar o entendimento pelo leitor. Este algoritmo é dividido em dois, um principal e um sub-algoritmo. O sub-algoritmo na verdade é uma rotina utilizada diversas vezes no algoritmo principal e por este motivo é colocado a parte, sendo apenas chamado nos momentos devidos.

Cabe lembrar que um pseudocódigo é na verdade uma forma genérica de escrever um algoritmo qualquer, utilizando uma linguagem simples, a qual dispensa a necessidade de conhecer uma sintaxe de linguagem de programação.

6.4.1 Algoritmo principal

- 1: **Dados de entrada:**
- 2: embarcação na base portuária ($a_{0,0} = 1$ e $b_{0,0} = 0$);
- 3: parâmetro $a_{i,0}, a_{j,0}$ na lista A iguais a 1 para os clientes que demandarem PSR, onde $a_{i,0}$ é o índice da posição de origem e $a_{j,0}$ o índice da posição de destino;
- 4: **Se** PRSR for solicitada antes da embarcação sair do porto **então**
- 5: arco $x[i][j] = 1$, onde i é o índice da origem e j o índice de destino.
 Como a embarcação está no porto, $i = 0$;
- 6: **Fim**
- 7: executar CPLEX para obtenção da rota otimizada;
- 8: armazenar destino j da embarcação e distância correspondente ao arco $x[i][j]$;
- 9: **Enquanto** $j \neq 0$ (quando $j = 0$ embarcação terá retornado ao porto **faça**
- 10: **Se** plataforma tiver sido parcialmente atendida **então**

```

11:      Se a plataforma já tiver sido visitada então
12:          sem mais visitas adicionais permitidas na lista B;
13:          Chamar: rotina de interação;
14:      Senão
15:          Se plataforma cliente requerer NRSR então
16:              definir parâmetro  $b_{j,k} = 1$ ;
17:              Senão
18:                  Chamar: rotina de interação;
19:              Fim
20:          Fim
21:      Senão
22:          Chamar: rotina de interação;
23:      Fim

```

6.4.2 Sub-algoritmo

```

1:  Rotina de interação:

2:  Se RSR for solicitada no instante de tempo  $t_k$  então
3:      definir parâmetro  $b_j = 1$  na lista B;
4:      Se RSR for do tipo PRSR então
5:          arco  $x[i][j] = 1$ , onde  $i$  é o índice da plataforma onde a
       embarcação se encontra no momento  $t_k$  e  $j$  o índice da
       plataforma que solicitou a PRSR;
6:          executar CPLEX para obtenção da rota otimizada;
7:          armazenar destino  $j$  da embarcação e distância correspondente
       ao arco  $x[i][j]$ ;
8:      Senão
9:          armazenar destino  $j$  da embarcação e distância correspondente
       ao arco  $x[i][j]$ ;
10:     Fim
11: Fim

```

6.5 Modelo programação linear inteira mista

Apresentado o sequenciamento lógico e a proposta para o algoritmo computacional para solução do problema em duas etapas, nesta seção é apresentada a formulação para otimização da rota das embarcações de suprimento a cada iteração, de modo que para cada viagem a distância total navegada seja minimizada e todas as visitas do tipo PSR e RSR sejam atendidas.

Para tanto é utilizada como base a formulação introduzida por Aas et al. (2007) [7], a qual permite que cada plataforma cliente seja visitada até duas vezes em

momentos distintos em uma mesma viagem da embarcação de suprimento. Nesta formulação não é considerado o caráter capacitado do problema, ou seja, a capacidade para armazenamento de cargas na plataforma e capacidade da embarcação de suprimento (área de convés) não são relevantes nesta análise, uma vez que para cada viagem considera-se haver um planejamento prévio relativo ao volume de materiais a serem transportadas na ida e no retorno da embarcação, adequando assim as necessidades de forma que as capacidades envolvidas nunca sejam extrapoladas.

Por fim, a formulação é então implementada com uso do OPL (*Optimization Programming Language*), a qual é uma ferramenta do IBM ILOG CPLEX. Esta linguagem oferece rapidez no desenvolvimento, na implementação e resolução de modelos de otimização, usando programação matemática e de restrição para suporte a decisões analíticas. A principal motivação para utilizar o OPL como linguagem de programação está relacionada à similaridade da sua sintaxe a da formulação matemática. No Apêndice A deste documento é apresentado o código fonte do modelo em pauta, o qual será utilizado para solução do TSP e determinação das rotas base ou determinísticas, as quais serão encarradas como planejadas no desenvolvimento deste trabalho, e as rotas recalculadas após cada ponto de decisão.

6.5.1 Parâmetros

n - Número de plataformas;

d_{ij} - Distância entre da plataforma (nó) i para a plataforma (nó) j ;

y_i - Parâmetro inteiro que assume o valor 1 se a plataforma (nó) i demandar visita do tipo PSR, do contrário, assume o valor 0;

z_i - Parâmetro inteiro que assume o valor 1 se a plataforma (nó) i demandar visita do tipo RSR, do contrário, assume o valor 0.

6.5.2 Variável de decisão

x_{ij} - Variável binária que assume o valor 1 se a embarcação navega diretamente do nó i para o nó j na solução, do contrário, assume o valor 0;

u_i, u_j - Variáveis auxiliares utilizadas para eliminação de sub-rotas. Representa a identidade do nó em si;

6.5.3 Função objetivo e restrições

$$\min \sum_{i=1}^{2n} \sum_{j=1}^{2n} d_{ij} x_{ij} \quad x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i, j) \text{ estiver no roteiro} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\forall i, j = 1, \dots, 2n, i \neq j; j \neq i + n \text{ se } 1 \leq i \leq n; j \neq i - n \text{ se } n + 1 \leq i \leq 2n$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{2n} x_{ij} = y_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{2n} x_{ij} = y_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{2n} x_{ij} = z_{j-n} \quad \forall j = n + 1, n + 2, \dots, 2n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{2n} x_{ij} = z_{i-n} \quad \forall i = n + 1, n + 2, \dots, 2n \quad (4)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad \forall i = 2, \dots, 2n, j = 2, \dots, 2n, i \neq j \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, 2n, j = 1, \dots, 2n, i \neq j \quad (6)$$

$$y_i, z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

- (1) Fluxo de entrada: garante a chegada da embarcação em cada um dos nós (plataforma) apenas uma vez. Para expressar a possibilidade de duas visitas a cada plataforma (nó), associa-se a cada plataforma dois nós i e $i + n$, sendo o segundo cópia do primeiro. Por este motivo o somatório é realizado para o intervalo compreendido entre i igual a 1 e $2n$;
- (2) Fluxo de saída: idem a primeira restrição, com a diferença que está garantir que a embarcação tenha apenas uma saída para cada um dos nós (plataforma);
- (3) Idem à restrição (1), ou seja, fluxo de entrada que garante chegada única ao nó replicado $i + n$ caso revisita a este nó seja necessária;
- (4) Idem à restrição (2), ou seja, fluxo de saída que garante saída única do nó replicado $i + n$ caso revisita a este nó tenha sido necessária;
- (5) Eliminação de sub-rotas. A formulação utilizada é a de Miller-Tucker-Zemlin apresentada no artigo de Pataki (2000) [26];
- (6) Restrição de sinal: variável de decisão binária com filtro para índices i e j de mesmo valor. Este filtro existe, pois, entende-se que a origem e destino da embarcação não deve ser a mesma plataforma;
- (7) Restrição de sinal: parâmetros binários;
- (8) Restrição de sinal: variável de decisão binária;

7 ESTUDO COMPUTACIONAL

Nesta seção instâncias do problema estudado neste documento foram resolvidas através da metodologia demonstrada anteriormente com uso de um equipamento dotado de um processador AMD A10 de 2,1 GHz e 8 GB de RAM.

Para solução destas instâncias uma interface homem-máquina foi criada em planilha do Microsoft Office Excel, através da qual o usuário final pode de maneira simples configurar os dados de entrada e os parâmetros desejados a cada loop de iteração do procedimento em duas etapas. Estes dados são importados pelo IBM ILOG CPLEX com uso das funções “*SheetConnection*”, as quais permitem estabelecer uma conexão entre os softwares. Somado a isto, nesta mesma planilha foram incorporadas restrições com uso das funções disponíveis no Microsoft Office Excel de forma que o sequenciamento lógico do processo que consta na seção 0 seja obrigatoriamente respeitado. Por fim, uma macro foi gerada no Microsoft Office Excel permitindo com um simples clique por parte do usuário final executar o modelo de programação linear inteira mista da seção 6.5.

De posse da ferramenta descrita no parágrafo anterior, visando verificar a eficiência do modelo proposto, gerou-se uma matriz de distâncias hipotética com 48 diferentes posições de clientes também hipotéticos. Esta matriz foi então utilizada na solução de diferentes cenários do ponto de vista do número de clientes envolvidos em um mesmo atendimento logístico qualquer. Ou seja, variou-se o número de clientes que deveriam ser visitados a cada viagem de um veículo para que assim fosse possível avaliar o tempo necessário para retorno da solução otimizada. Na Figura 7.1 podemos observar que os resultados estão dentro do razoável, uma vez que para $n < 48$, onde n é o número de clientes, mesmo para o cenário em que todos os 48 clientes são visitados duas vezes o tempo computacional despendido para obtenção da solução não ultrapassa quatro minutos. Importante notar, entretanto, que para $n > 28$ o tempo de

computacional necessário para encontrar a solução ideal começa a aumentar exponencialmente.

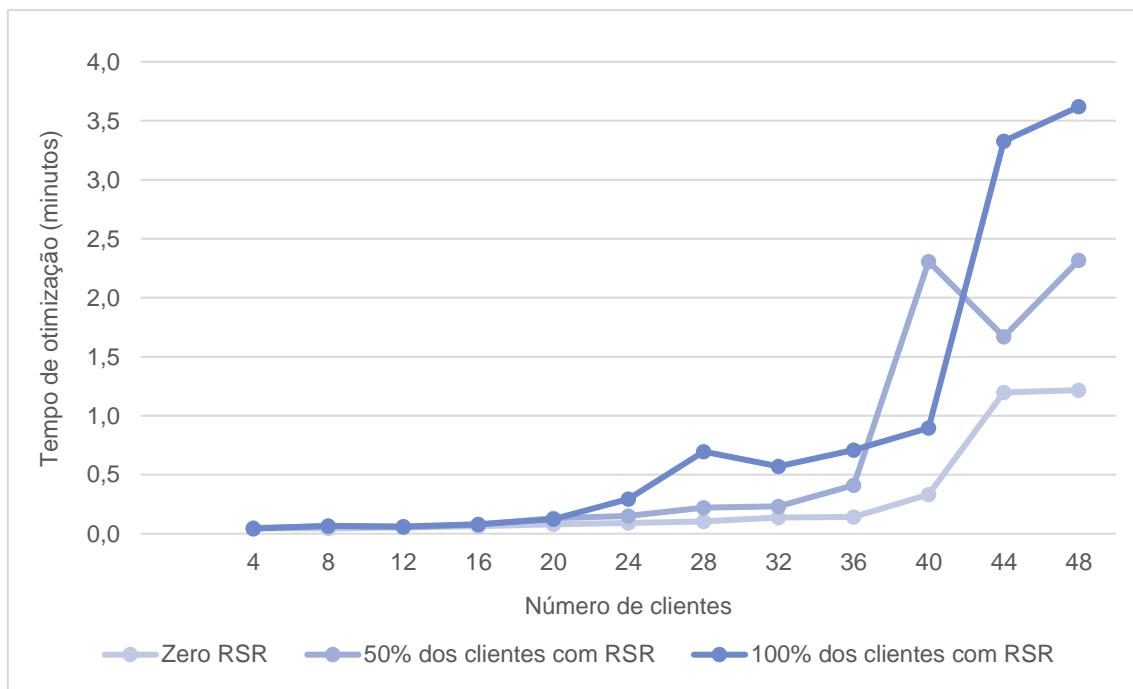


Figura 7.1 – Tempo computacional versus número de clientes

Apenas para clarificar o entendimento do leitor, no gráfico a linha que representa zero RSR na verdade mostra o tempo para se obter a solução ótima considerando que os 48 clientes solicitaram apenas uma visita do tipo PSR. A segunda linha por sua vez, mostra os resultados obtidos para um cenário em que os 48 clientes solicitaram uma visita do tipo PSR e outras 24 clientes (50%) solicitaram visitas adicionais do tipo NRSR. Já a última linha mostra o tempo despendido para uma situação em que os 48 clientes solicitam visitas adicionais do tipo NRSR além da visita do tipo PSR.

7.1 Análise competitiva dos resultados

Para avaliação das soluções encontradas e desempenho do método proposto, alguns conceitos e parâmetros são primeiramente definidos nesta seção.

Ferruci (2013) [27] aborda o conceito de análise competitiva (em inglês *competitive analysis*), a qual nada mais é que um método desenvolvido para avaliar o desempenho de soluções chamadas de online comparativamente ao desempenho de soluções chamadas offline.

Para o estudo tratado neste trabalho, as soluções de cada instância ou valor da função objetivo nada mais é que a distância total percorrida por uma embarcação de suprimento em uma rota específica durante um atendimento qualquer a algumas plataformas *offshore*. Dessa forma, definimos abaixo três parâmetros:

- Rota estática: a característica principal deste tipo de rota é conter apenas visitas do tipo PSR para os clientes envolvidos. Ou seja, as plataformas clientes recebem apenas uma visita da embarcação de suprimento e todas as escalas desta embarcação são conhecidas antes da mesma zarpar da base portuária de origem. Dessa forma, o roteamento é sempre o mais otimizado possível do ponto de vista da distância percorrida, visto não haver alterações na rota;
- Rota online: representa o valor da função objetivo para a instância gerada pelo uso da heurística de reotimização em duas etapas, isto é, esta solução representa o valor da distância total percorrida pela embarcação de suprimento, a qual deve satisfazer uma sequência imprevisível de solicitações, atendendo cada requisição sem ter previamente as informações das solicitações do tipo RSR que ainda ocorrerão ao longo da rota;
- Rota offline: representa o valor da função objetivo para a instância gerada para o caso de todas as informações relevantes serem hipoteticamente conhecidas antes da partida da embarcação de suprimento da base portuária. Ou seja, é o valor da distância total percorrida considerando que todas as possíveis solicitações que por ventura venham a ocorrer durante

a viagem da embarcação de suprimento sejam conhecidas antes do zarpe da embarcação.

De posse dos parâmetros acima, duas razões competitivas (CR - *Competitive Ratio*) são então utilizadas para avaliação do desempenho conforme mencionado anteriormente:

- CR: razão competitiva da distância da rota online pela distância da rota offline;

Por fim, além do parâmetro CR, utilizamos ainda o grau de dinamismo (DOD – *Degree of Dynamism*), parâmetro este definido por Lund et al. (1996) [28] como a razão entre o número de solicitações dinâmicas, conhecidas neste trabalho como RSR, e o número de total de solicitações, ou seja, as estáticas mais as dinâmicas ou as PSR mais as RSR.

Posto isto, dois conjuntos de instâncias foram estudados. O primeiro conjunto é um grupo de quatro plataformas *offshore*, para cada uma das quais é alocada uma única embarcação de suprimento. As plataformas mencionadas estão localizadas na Bacia de Santos, no Brasil, cuja matriz de distância (em milhas náuticas) é mostrada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Matriz de distância entre as plataformas *offshore* (X, Y, Z e W)

	Base	A	B	C	D
Base	0	159,89	155,53	151,93	157,30
A	159,89	0	6,84	9,67	4,06
B	155,53	6,84	0	3,61	2,78
C	151,93	9,67	3,61	0	5,88
D	157,30	4,06	2,78	5,88	0

Na Figura 7.2 a frequência de atendimento com uma, duas, três ou quatro solicitações aleatórias é mostrada para o período compreendido entre junho de 2017 a janeiro de 2018 através da qual podemos afirmar que na grande maioria dos casos nenhuma ou no máximo uma RSR é feita durante a viagem de uma embarcação de suprimentos isolada. Assim como podemos inferir que poucos são os casos em que duas, três ou quatro visitas adicionais são realizadas.

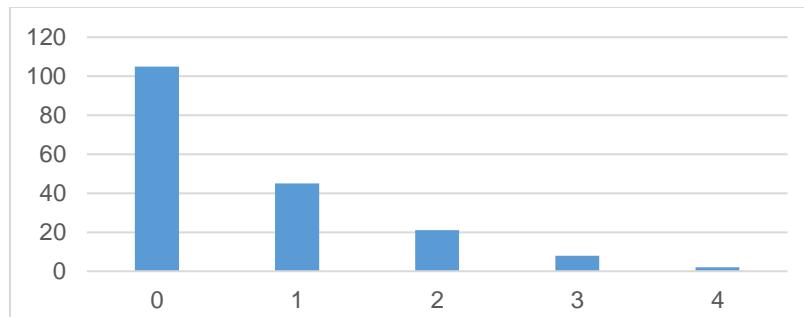


Figura 7.2 - Número de viagens feitas pelas embarcações vs. número de RSR

Na Figura 7.3 podemos observar uma rota típica de uma embarcação de suprimento que serve quatro plataformas.

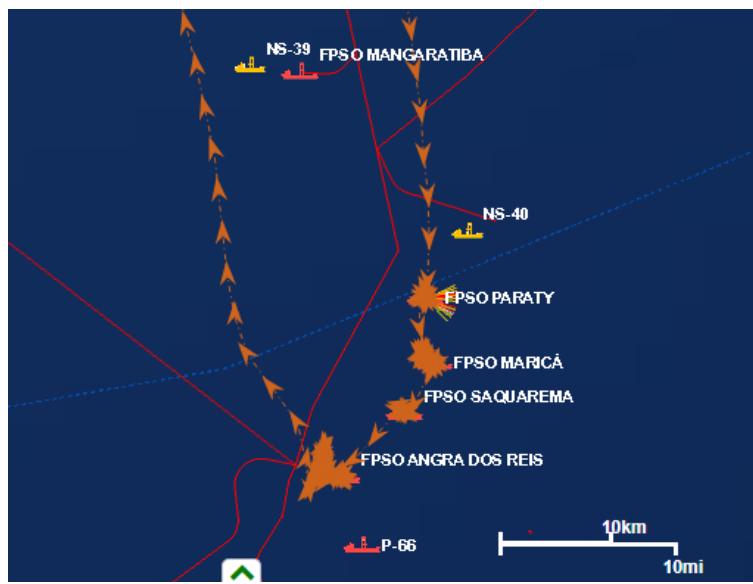


Figura 7.3 - Rota de uma embarcação ao longo de quatro plataformas (Fonte: imagem elaborada pelo autor)

O segundo grupo de plataformas *offshore* que foram estudadas consiste em doze plataformas que também estão localizadas na Bacia de Santos e cuja matriz de distância está apresentada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Matriz de distância entre as plataformas *offshore* (A, B, C, ..., K, L)

	Base	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Base	0,00	118,52	159,90	158,00	166,63	135,54	139,72	155,54	151,93	118,79	157,31	175,25	163,92
A	118,52	0,00	43,77	58,54	57,76	23,01	24,78	38,23	34,65	27,93	40,45	67,21	47,54
B	159,90	43,77	0,00	33,92	21,36	24,51	20,19	6,85	9,68	62,12	4,06	28,98	4,04
C	158,00	58,54	33,92	0,00	16,86	36,27	37,06	38,70	38,92	84,46	36,69	20,50	35,20
D	166,63	57,76	21,36	16,86	0,00	34,91	33,26	27,69	29,31	80,44	25,09	9,45	21,11
E	135,54	23,01	24,51	36,27	34,91	0,00	5,20	21,38	18,13	48,21	22,48	44,37	28,56
F	139,72	24,78	20,19	37,06	33,26	5,20	0,00	16,41	13,05	47,85	17,75	42,65	24,20
G	155,54	38,23	6,85	38,70	27,69	21,38	16,41	0,00	3,61	55,38	2,79	35,69	9,73
H	151,93	34,65	9,68	38,92	29,31	18,13	13,05	3,61	0,00	52,50	5,89	37,76	13,05
I	118,79	27,93	62,12	84,46	80,44	48,21	47,85	55,38	52,50	0,00	58,12	89,55	65,01
J	157,31	40,45	4,06	36,69	25,09	22,48	17,75	2,79	5,89	58,12	0,00	32,96	7,16
K	175,25	67,21	28,98	20,50	9,45	44,37	42,65	35,69	37,76	89,55	32,96	0,00	27,74
L	163,92	47,54	4,04	35,20	21,11	28,56	24,20	9,73	13,05	65,01	7,16	27,74	0,00

Na Figura 7.4 é possível verificar a localização geográfica do grupo de doze plataformas.



Figura 7.4 - Grupo de doze plataformas (Fonte: imagem elaborada pelo autor)

7.2 Instâncias - Grupo de quatro plataformas

A partir dos parâmetros definidos na seção 7.1, *Competitive Ratio* e *Degree of Dynamism*, o desempenho da heurística proposta neste trabalho é avaliado primeiramente para um agrupamento de quatro plataformas em diferentes situações da vida real.

7.2.1 Instância 01

Nesta primeira instância considerou-se cenários em que uma dentre as quatro plataformas do agrupamento solicita uma visita do tipo NRSR quando a embarcação de suprimento se encontra justamente em sua segunda escala da rota online.

Conforme podemos observar na Tabela 7.3 a razão competitiva CR para todas as instâncias é igual a um, fato que nos permite inferir que ter a informação relacionada a necessidade destas NRSR antecipadamente à saída da embarcação da base portuária não traz qualquer ganho do ponto de vista de otimização no roteamento, pois, mesmo sendo estas informações reveladas durante a execução da rota, a distância percorrida pela embarcação é idêntica. Com relação ao grau de dinamismo (DOD) podemos notar que para todas as instâncias em que houve uma RSR o valor é o mesmo, comprovando que houve de fato a execução de uma visita adicional.

Tabela 7.3 – Parâmetros resultantes da instância 01 (quatro plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	322,291	322,291	322,291	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	322,291	330,414	330,414	1,0000	0,250	NRSR colocada pela plataforma 1 com a embarcação na 2º escala;
2	322,291	324,780	324,780	1,0000	0,250	NRSR colocada pela plataforma 2 com a embarcação na 2º escala;
3	322,291	324,007	324,007	1,0000	0,250	NRSR colocada pela plataforma 3 com a embarcação na 2º escala;
4	322,291	323,763	323,763	1,0000	0,250	NRSR colocada pela plataforma 4 com a embarcação na 2º escala;

7.2.2 Instância 02

Similar à instância anterior, considerou-se cenários em que uma dentre as quatro plataformas do agrupamento faz uma solicitação randômica quando a embarcação de suprimento se encontra em sua segunda escala da rota online, mas desta vez do tipo PRSR.

É possível notar através do parâmetro CR que apenas um dos casos apresentou valor igual a um, que dois deles apresentaram valores maiores que a unidade e que um caso específico não apresentou valor para estes parâmetros. No campo observação da

Tabela 7.4 é possível verificar no detalhe os motivos das variações nestes valores.

Tabela 7.4 – Parâmetros resultantes da instância 02 (quatro plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	322,291	322,291	322,291	1,0000	0,0000	Sem PRSR;
1	322,291	322,291	323,762	1,0046	0,0000	PRSR colocada pela plataforma 1 com a embarcação na 2º escala;
2	322,291	-	-	-	-	Sem parâmetros para esta instância, pois a posição da embarcação é justamente a plataforma 2, não sendo possível haver uma visita prioritária para a própria plataforma;
3	322,291	324,007	329,005	1,0154	0,250	PRSR colocada pela plataforma 3 com a embarcação na 2º escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
4	322,291	322,291	322,291	1,0000	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 4 com a embarcação na 2º escala. Como a plataforma 4 neste cenário seria a próxima a ser visitada de acordo com a rota estática, as razões de competitividade ficam iguais a 1 e o DOD igual a zero;

7.3 Instâncias - Grupo de doze plataformas

Assim como apresentado na seção anterior para o agrupamento de quatro plataformas, nesta seção também é avaliado o desempenho da heurística proposta, mas desta vez para um agrupamento de 12 plataformas. Os mesmos parâmetros previamente definidos, CR e DOD, foram utilizados e os resultados são apresentados nos itens que seguem.

7.3.1 Instância 01

O cenário aqui proposto segue o mesmo raciocínio apresentado no instância da seção 7.2.1, ou seja, uma plataforma cliente dentre as doze existentes no agrupamento solicita uma visita do tipo NRSR quando a embarcação de suprimento se encontra justamente em sua segunda escala da rota online.

Conforme Tabela 7.5 podemos observar que o comportamento para este caso é muito similar ao apresentado no caso da seção 7.2.1, com a diferença de que há um pequeno incremento no parâmetro CR, fato que nos permite inferir que existe uma pequena perda de otimização quando as informações são reveladas durante a execução da rota. Com relação ao grau de dinamismo (DOD) podemos notar que para todas as instancias em que houve uma RSR o valor é o mesmo, comprovando que houve de fato a execução de uma visita adicional.

Tabela 7.5 - Parâmetros resultantes do instância 01 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 1 com a embarcação na 2ª escala;
2	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 2 com a embarcação na 2ª escala;
3	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 3 com a embarcação na 2ª escala;
4	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 4 com a embarcação na 2ª escala;
5	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 5 com a embarcação na 2ª escala;
6	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 6 com a embarcação na 2ª escala;
7	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 7 com a embarcação na 2ª escala;
8	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 8 com a embarcação na 2ª escala;
9	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 9 com a embarcação na 2ª escala;
10	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 10 com a embarcação na 2ª escala;
11	411,546	415,832	417,358	1,0037	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 11 com a embarcação na 2ª escala;
12	411,546	415,832	437,041	1,0510	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 2ª escala;

7.3.2 Instância 02

Neste segundo instância também com doze plataformas no mesmo agrupamento foi estabelecido que para cada instância uma plataforma diferente demandará uma PRSR quando a embarcação estiver em sua décima segunda escala da rota online. Situação bem similar à apresentada no estudo da seção 7.2.2.

Tabela 7.6 - Parâmetros resultantes do instância 02 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 1 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
2	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 2 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
3	411,546	418,260	418,260	1,0069	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 3 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
4	411,546	418,260	418,260	1,0797	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 4 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
5	411,546	418,260	418,260	1,0915	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 5 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
6	411,546	418,260	418,260	1,0999	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 6 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
7	411,546	418,260	432,795	1,1983	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 7 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
8	411,546	418,260	430,233	1,2179	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 8 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
9	411,546	-	-	-	-	Sem parâmetros para esta instância pois a embarcação está na plataforma 9, não fazendo sentido haver uma visita prioritária para a própria plataforma;
10	411,546	418,260	444,403	1,0286	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 10 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;

11	411,546	418,260	444,403	1,0348	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 11 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
12	411,546	418,260	444,403	1,0625	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 12ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;

7.3.3 Instância 03

Seguindo na mesma linha da primeira instância com doze plataformas, fixamos um cenário em que uma plataforma cliente solicita uma visita do tipo NRSR quando a embarcação de suprimento se encontra na sexta escala da rota online. A intenção é verificar se o fato das NRSR serem solicitadas quando a embarcação de suprimento já cumpriu praticamente metade da rota estática interfere muito nos parâmetros analisados. Analisando a Tabela 7.7 verificamos que há apenas um leve incremento na razão de competitividade e que para alguns casos de esta razão é igual ao valor 1, sugerindo que estas foram servidas pela embarcação antes da NRSR ser solicitada.

Tabela 7.7 - Parâmetros resultantes da instância 03 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	427,910	430,601	1,0063	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 1 com a embarcação na 6ª escala;
2	411,546	415,832	415,832	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 2 com a embarcação na 6ª escala;
3	411,546	439,450	439,450	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 3 com a embarcação na 6ª escala;
4	411,546	417,358	417,358	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 4 com a embarcação na 6ª escala;
5	411,546	421,830	425,353	1,0084	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 5 com a embarcação na 6ª escala;
6	411,546	418,516	430,324	1,0282	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 6 com a embarcação na 6ª escala;
7	411,546	417,119	417,119	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 7 com a embarcação na 6ª escala;
8	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 8 com a embarcação na 6ª escala;
9	411,546	448,854	456,798	1,0177	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 9 com a embarcação na 6ª escala;

10	411,546	416,606	418,730	1,0051	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 10 com a embarcação na 6ª escala;
11	411,546	427,625	427,625	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 11 com a embarcação na 6ª escala;
12	411,546	418,690	418,690	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 6ª escala;

7.3.4 Instância 04

Similar ao cenário anterior, fixamos agora um cenário em que uma plataforma cliente solicita uma visita quando a embarcação de suprimento se encontra na sexta escala da rota online, mas desta vez a visita é do tipo PRSR.

Importante notar, conforme Tabela 7.8, que a razão de competitividade é muito mais sensível para solicitações do tipo, visto não haver qualquer limitação para o novo arranjo na rota, ou seja, a depender da solicitação, por esta ser prioritária, a distância navegada entre a posição atual da embarcação e a plataforma solicitante pode ser muito significativa. Ao mesmo tempo, para alguns casos específicos, as solicitações prioritárias estão alinhadas com o planejamento prévio, resultando em um aumento nulo na distância total navegada pela embarcação. Note ainda que para alguns casos o grau de dinamismo é nulo, o que nos permite afirmar que nenhuma visita adicional foi necessária, havendo apenas um reordenamento nas escalas já previstas para a embarcação de suprimento.

Tabela 7.8 - Parâmetros resultantes do instância 04 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	427,910	487,429	1,1391	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 1 com a embarcação na 6ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
2	411,546	411,546	418,729	1,0175	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 2 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;
3	411,546	411,546	446,763	1,0856	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 3 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;

4	411,546	411,546	449,782	1,0929	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 4 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;
5	411,546	421,830	452,617	1,0730	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 5 com a embarcação na 6ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
6	411,546	418,516	442,916	1,0583	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 6 com a embarcação na 6ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
7	411,546	-	-	-	-	Sem parâmetros para esta instância pois a embarcação está na plataforma 7, não fazendo sentido haver uma visita prioritária para a própria plataforma.
8	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 8 com a embarcação na 6ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
9	411,546	448,854	522,265	1,1636	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 9 com a embarcação na 6ª escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
10	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 10 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;
11	411,546	411,546	451,163	1,0963	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 11 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;
12	411,546	411,546	421,854	1,0250	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 6ª escala. Somente uma visita necessária;

7.3.5 Instância 05

Para cada instância deste caso a mesma plataforma, no caso a nomeada como 12, demandará uma NRSR quando a embarcação estiver em diferentes posições ao longo da rota. A intenção aqui é verificar como os parâmetros CR e DOD se comportam a partir do momento que a solicitação ocorre quando a embarcação está mais próxima do final de sua viagem.

Na Tabela 7.9 podemos notar que o comportamento do CR está adequado, pois quanto mais próximo do final da viagem, menos flexibilidade existe para otimizar a rota adicionando novas visitas, fato que traz um impacto considerável na distância total a ser percorrida pela embarcação.

Tabela 7.9 - Parâmetros resultantes do instância 05 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 1 ^a escala;
2	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 2 ^a escala;
3	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 3 ^a escala;
4	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 4 ^a escala;
5	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 5 ^a escala;
6	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 6 ^a escala;
7	411,546	418,260	423,049	1,0114	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 7 ^a escala;
8	411,546	418,260	430,233	1,0286	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 8 ^a escala;
9	411,546	418,260	432,795	1,0348	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 9 ^a escala;
10	411,546	418,260	444,403	1,0625	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 10 ^a escala;
11	411,546	418,260	444,403	1,0625	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 11 ^a escala;
12	411,546	418,260	444,403	1,0625	0,0833	NRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 12 ^a escala;

7.3.6 Instância 06

Diferentemente dos casos anteriores envolvendo uma PRSR, neste cenário foi considerado que uma plataforma específica, no caso a nomeada como 12, faz tal solicitação quando a embarcação estiver em diferentes posições ao longo da rota.

Assim como para o caso apresentado em 7.3.4 é possível observar grande variação no parâmetro CR e situações em que o DOD é nulo.

Tabela 7.10 - Parâmetros resultantes do instância 06 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	Sem RSR;
1	411,546	411,546	420,648	1,0221	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 1 ^a escala. Somente uma visita necessária;
2	411,546	411,546	424,742	1,0321	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 2 ^a escala. Somente uma visita necessária;
3	411,546	411,546	430,206	1,0453	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 3 ^a escala. Somente uma visita necessária;
4	411,546	411,546	411,546	1,0000	0,0000	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 4 ^a escala. Somente uma visita necessária;
5	411,546	-	-	-	-	Sem parâmetros para esta instância pois a embarcação está na plataforma 12, não fazendo sentido;
6	411,546	418,260	418,260	1,0000	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 6 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
7	411,546	418,260	423,049	1,0114	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 7 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
8	411,546	418,260	430,233	1,0286	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 8 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
9	411,546	418,260	432,795	1,0348	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 9 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
10	411,546	418,260	469,161	1,1217	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 10 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
11	411,546	418,260	467,727	1,1183	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 11 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;
12	411,546	418,260	444,403	1,0625	0,0833	PRSR colocado pela plataforma 12 com a embarcação na 12 ^a escala. Esta solicitação foi tratada com uma visita adicional à plataforma requisitante, visto que sua PSR já havia sido atendida;

7.3.7 Instância 07

Neste sétimo instância foram estabelecidas diferentes combinações entre plataformas que demandam NRSR em quanto uma única solicita PRSR quando a embarcação está na primeira plataforma da rota online. Esse detalhamento pode ser observado na coluna ‘observação’ da Tabela 7.11.

Para as instâncias 6 e 13 note que nenhum parâmetro foi apresentado, pois para uma destas instâncias a embarcação está na própria plataforma que faria o RSR, não fazendo sentido haver valores para os parâmetros de interesse.

Tabela 7.11 - Parâmetros resultantes do instância 07 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR2	DOD	Observação
0	322,291	322,291	322,291	1,000	0,000	Sem RSR;
1	322,291	427,910	439,198	1,026	0,083	NRSR: 1; PRSR: N/A;
2	322,291	322,291	500,992	1,554	0,000	NRSR: N/A; PRSR: 1;
3	322,291	475,338	487,602	1,026	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: N/A;
4	322,291	459,950	539,165	1,172	0,417	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: 1;
5	322,291	471,052	520,793	1,106	0,417	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6; PRSR: 2;
6	322,291	-	-	-	-	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6; PRSR: 3;
7	322,291	469,526	483,309	1,029	0,417	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6; PRSR: 4;
8	322,291	471,906	524,392	1,111	0,417	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6; PRSR: 5;
9	322,291	469,344	527,706	1,124	0,417	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5; PRSR: 6;
10	322,291	527,706	544,990	1,033	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: N/A;
11	322,291	542,256	620,327	1,144	0,917	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 1;
12	322,291	531,786	578,029	1,087	0,917	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 2;
13	322,291	-	-	-	-	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 3;
14	322,291	526,914	542,161	1,029	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 4;
15	322,291	529,294	581,780	1,099	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 5;
16	322,291	526,732	585,094	1,111	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 6;
17	322,291	532,212	582,382	1,094	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 7;

18	322,291	526,012	573,307	1,090	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12; PRSR: 8;
19	322,291	504,520	600,276	1,190	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12; PRSR: 9;
20	322,291	527,666	578,345	1,096	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12; PRSR: 10;
21	322,291	519,630	531,894	1,024	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12; PRSR: 11;
22	322,291	527,706	573,346	1,086	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; PRSR: 12;

7.3.8 Instância 08

Neste sétimo instância foram estabelecidas diferentes combinações entre plataformas que demandam NRSR em quanto uma única solicita PRSR quando a embarcação está na sexta plataforma da rota online. Esse detalhamento pode ser observado na coluna ‘observação’ da Tabela 7.12.

Para a instancia 20 nenhum parâmetro foi apresentado, pois para uma destas instancias a embarcação está na própria plataforma que faria o RSR, não fazendo sentido haver valores para os parâmetros de interesse.

Tabela 7.12 - Parâmetros resultantes do instância 08 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	322,291	322,291	322,291	1,000	0,000	Sem RSR;
1	322,291	427,910	439,198	1,026	0,083	NRSR: 1; PRSR: N/A;
2	322,291	322,291	476,658	1,479	0,000	NRSR: N/A; PRSR: 1;
3	322,291	475,338	521,505	1,097	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: N/A;
4	322,291	459,950	559,536	1,217	0,417	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: 1;
5	322,291	471,052	527,784	1,120	0,500	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6; PRSR: 2;
6	322,291	447,434	528,563	1,181	0,500	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6; PRSR: 3;
7	322,291	469,526	529,524	1,128	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6; PRSR: 4;
8	322,291	471,906	542,777	1,150	0,417	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6; PRSR: 5;
9	322,291	469,344	540,568	1,152	0,417	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5; PRSR: 6;
10	322,291	527,706	574,104	1,088	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: N/A;

11	322,291	542,256	629,353	1,161	0,917	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 1;
12	322,291	531,786	580,892	1,092	1,000	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 2;
13	322,291	504,822	580,892	1,151	1,000	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 3;
14	322,291	526,914	583,374	1,107	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 4;
15	322,291	529,294	590,252	1,115	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 5;
16	322,291	526,732	590,163	1,120	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 6;
17	322,291	532,212	574,501	1,079	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 7;
18	322,291	526,012	568,571	1,081	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12; PRSR: 8;
19	322,291	504,520	585,672	1,161	0,917	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12; PRSR: 9;
20	322,291	527,666	-	-	-	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12; PRSR: 10;
21	322,291	519,630	581,831	1,120	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12; PRSR: 11;
22	322,291	527,706	578,511	1,096	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; PRSR: 12;

7.3.9 Instância 09

Neste sétimo instância foram estabelecidas diferentes combinações entre plataformas que demandam NRSR em quanto uma única solicita PRSR quando a embarcação está na sexta plataforma da rota online. Esse detalhamento pode ser observado na coluna ‘observação’ da Tabela 7.13.

Para a instancia 19 nenhum parâmetro foi apresentado, pois para uma destas instancias a embarcação está na própria plataforma que faria o RSR, não fazendo sentido haver valores para os parâmetros de interesse.

Tabela 7.13 - Parâmetros resultantes do instância 09 (doze plataformas)

Instância	Rota Estática	Rota Offline	Rota Online	CR	DOD	Observação
0	322,291	322,291	322,291	1,000	0,000	Sem RSR;
1	322,291	427,910	439,198	1,026	0,083	NRSR: 1; PRSR: N/A;
2	322,291	322,291	439,198	1,363	0,083	NRSR: N/A; PRSR: 1;
3	322,291	475,338	565,292	1,189	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: N/A;

4	322,291	459,950	565,292	1,229	0,500	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6; PRSR: 1;
5	322,291	471,052	576,869	1,225	0,500	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6; PRSR: 2;
6	322,291	447,434	582,338	1,302	0,500	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6; PRSR: 3;
7	322,291	469,526	590,888	1,258	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6; PRSR: 4;
8	322,291	471,906	578,922	1,227	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6; PRSR: 5;
9	322,291	469,344	576,802	1,229	0,500	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5; PRSR: 6;
10	322,291	527,706	622,814	1,180	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: N/A;
11	322,291	542,256	622,814	1,149	1,000	NRSR: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 1;
12	322,291	531,786	641,045	1,205	1,000	NRSR: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 2;
13	322,291	504,822	630,758	1,249	1,000	NRSR: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 3;
14	322,291	526,914	640,772	1,216	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 4;
15	322,291	529,294	627,342	1,185	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 5;
16	322,291	526,732	625,222	1,187	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 6;
17	322,291	532,212	628,799	1,181	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12; PRSR: 7;
18	322,291	526,012	622,814	1,184	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12; PRSR: 8;
19	322,291	-	-	-	-	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12; PRSR: 9;
20	322,291	527,666	634,055	1,202	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12; PRSR: 10;
21	322,291	519,630	643,255	1,238	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12; PRSR: 11;
22	322,291	527,706	641,194	1,215	1,000	NRSR: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11; PRSR: 12;

8 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

O problema de roteamento de uma única embarcação de suprimento que atende um grupo de plataformas *offshore* foi formulada de acordo com a estrutura proposta nas abordagens de Ulmer et al., as quais estão listadas nas referências bibliográficas deste trabalho.

Adicionalmente, a supracitada variante do problema possui grande importância na logística *upstream* na indústria de petróleo e gás e foi resolvida empregando uma heurística de reotimização de programação linear inteira mista (MILP) em duas etapas com auxílio de uma interface homem-máquina e os softwares Microsoft Office Excel e IBM ILOG CPLEX para casos do mundo real da indústria na plataforma sul do Oceano Atlântico.

Somado a isto, 146 diferentes instâncias foram calculadas para diferentes cenários, sejam eles:

- 1x NRSR colocada por diferentes plataformas de um mesmo cluster, mas em momentos similares (mesma localização da embarcação);
- 1x PRSR colocada por diferentes plataformas de um mesmo cluster, mas em momentos similares (mesma localização da embarcação);
- 1x NRSR colocada pela mesma plataforma de um mesmo cluster, mas em momentos diversos (diferentes localizações da embarcação);
- 1x PRSR colocada pela mesma plataforma de um mesmo cluster, mas em momentos diversos (diferentes localizações da embarcação);
- 1x PRSR + nx NRSR em uma mesma viagem;

De posse dessas instâncias foi possível observar algumas particularidades para os termos CR e DOD. Essas particularidades são listadas abaixo de forma a destacar a

interpretação que a elas devem ser dadas, proporcionado assim avaliação de cenários diversos:

1. Por definição quanto mais próximo o parâmetro CR estiver do valor unitário melhor, pois isto representa que a função objetivo da rota online não se distanciou muito da rota offline;
2. Para situações diversas que a heurística apresentada neste trabalho for aplicada, como sugestão, valores limítrofes para o parâmetro CR pode ser atribuído de forma a restringir as variações nos custos totais para os cenários avaliados, auxiliando assim na tomada de decisão pelas pessoas responsáveis pelo planejamento e programação de veículos em grandes centros logísticos por exemplo;
3. Solicitações do tipo PRSR são as que mais causam distúrbios no parâmetro CR, uma vez que nestas situações opta-se por um maior nível de serviço ao cliente final em detrimento dos custos totais;
4. O parâmetro DOD é essencial para avaliar principalmente quando há solicitações do tipo PRSR o distúrbio causado pelo cliente demandante, pois através deste parâmetro é possível identificar se a visita para atender à solicitação de PRSR foi suficiente para atender a demanda como um todo ou se ainda foi necessário realizar a visita para atender a sua PSR;
5. Da mesma forma que para o parâmetro CR, um valor limiar para o DOD pode ser atribuído em modelos derivados ao apresentado neste trabalho de forma a atribuir uma disciplina operacional aos clientes.

Cabe ressaltar que para as instâncias analisadas, tanto o parâmetro CR, como o parâmetro DOD, mantiverem valores próximos do unitário, fato que comprova a qualidade da heurística empregada neste trabalho.

Por fim, existem várias extensões e generalizações para a variante do problema estudada neste trabalho, as quais merecem ser consideradas em trabalhos futuros de pesquisa. Algumas destas variações são as que seguem:

1. Avaliação do problema incluindo o caráter capacitado das embarcações de suprimento, bem como em plataformas *offshore*, além da incorporação de janela de tempo para as solicitações, estendendo assim o trabalho de Aas et al. (2007) [7] para permitir solicitações de serviço aleatórias;
2. Alocação de múltiplas embarcações de suprimento a agrupamentos de plataformas *offshore* com o objetivo de ampliar o trabalho de Halvorsen-Weare et al. [15] e Fagerholt [18] para permitir solicitações de serviço aleatórias;
3. Avaliar o problema do ponto de vista da indisponibilidade técnica de embarcações de suprimento durante sua viagem a um grupo de plataformas *offshore* ao qual ele está alocado com o objetivo de incorporar uma tolerabilidade às falhas no SDVRP e assim ampliar o trabalho de Dulai et al. (2018) para permitir solicitações de serviço aleatórias.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "World Energy Outlook," Agência Internacional de Energia, 2018.
- [2] Agra, D., "Análise empírica e proposta de novo modelo de planejamento logístico do transporte marítimo de cargas para os campos da Bacia de Santos da Petrobras," *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial*, Abril 2018.
- [3] Ferreira Filho, V. J. M., "Gestão de Operações e Logística na Produção de Petróleo," *Universidade Federal do Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos*, no. 1, p. 415, 2015.
- [4] Lopes, P. H. M., "Uma Solução para o Problema de Roteamento de Embarcações de Apoio "Offshore" Através da Metaheurística RTR," *Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2011.
- [5] Tabet, B.; Lopes, L. A. S., "Dimensionamento de frota de embarcações para o atendimento a plataformas e sondas marítimas," 2018.
- [6] Leite, R. P., "tonelada porte bruto (TPB)," *Maritime transport of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvment points*, Novembro 2012.
- [7] AAS, B.; GRIBKOVSKAIA, I.; HALSKAU, ø.; SHLOPAK, A., "Routing of supply vessels to petroleum installations," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 37, no. 2, pp. 164-179, 2007.
- [8] Gribkovskaia, I.; Sopot, E.;, "Routing of supply vessels to with deliveries and pickups of multiple commoditie," *Procedia Computer Science*, vol. 31, pp. 910-917, 2014.
- [9] AAS, B.; WALLACE, S. W.; HALSKAU, ø., "The role of supply vessels in offshore logistics," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 11, pp. 302-325, 2009.
- [10] SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V., "Ship Design for Efficiency and Economy," *Butterworth-Heinemann*, no. 2, p. 224, 1998.
- [11] AAS, B.; BUVIK, A.; CAKIC, D., "Outsourcing of logistics activities in a complex supply chain: a case study from the Norwegian oil and gas industry," *International Journal of Procurement Management*, vol. 1, no. 3, pp. 280-296, 2008.
- [12] AAS, B.; WALLACE, S. W., "Management of logistics planning," *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, vol. 3, no. 3, pp. 1-17, 2008.
- [13] ALBJERK, N. B.; DANIELSEN, T. K.; KREY, S., "Operational planning and disruption management in offshore logistics," *Department of Industrial Economics and Technology Management, Nowergian University of Science and Technology*, Junho 2015.

- [14] FAGERHOLT, K.; LINDSTAD, H., "Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea," *Omega*, vol. 28, no. 3, pp. 269-275, 2000.
- [15] Halvorsen-Weare, E.E., Fagerholt, K., Nonås, L.M., Asbjørnslett, B.E., "Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels," *European Journal of Operational Research*, pp. 508-517, 2012.
- [16] Halvorsen-Weare, E.E., Fagerholt, K., "Robust supply vessel planning," *Network Optimization (Springer)*, pp. 559-573, 2012.
- [17] Halvorsen-Weare, E.E., Fagerholt, K., "Optimization in offshore supply vessel planning," *Optimization and Engineering (Springer)*, pp. 1-25, 2016.
- [18] Fagerholt, K., "Ship scheduling with soft time windows – An optimisation based approach," *European Journal of Operation Research*, vol. 3, no. 131, pp. 559-571, 2001.
- [19] Borthen, T., Loennechen, H., "The multi-objective supply vessel planning problem," *Norwegian University of Science and Technology. Norwegian University of Science and Technology*, 2016.
- [20] Dulai, T.; Werner-Stark, Á.; Hangos, K.M.;, "Algorithm for directing cooperative vehicles of a vehicle routing problem for improving fault-tolerance," *Optimization and Engineering*, no. 19, pp. 239-270, 2017.
- [21] VALENTE, A. M.; NOVAES, A. G.; PASSAGLIA, E.; VIEIRA, H., "Gerenciamento de transporte e frotas," *Cengage Learning. São Paulo*, no. 2, 2008.
- [22] Ulmer, M.W.; Brinkman, J.; Mattfeld. D.C., "A rollout algorithm for vehicle routing with stochastic customer requests," *Logistics Management - Springer*, pp. 217-317, 2016.
- [23] Ulmer, M.W., Approximate Dynamic Programming for Dynamic Vehicle Routing, Springer Nature, 2017.
- [24] Ulmer, M. W.; Heilig, L.; Voß, S., "On the Value and Challenge of Real-Time Information in Dynamic Dispatching of Service Vehicles," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 59, no. 3, pp. 161-171, 2017.
- [25] Ulmer, M.W.; Soeffker, N.; Mattfeld, D.C., "Value function approximation for dynamic multi-period vehicle routing," *European Journal of Operational Research*, vol. 269, pp. 883-899, 2018.
- [26] Pataki, G., "The bad and the good-and-ugly formulations for the traveling salesman problem".*Department of Industrial Engineering and Operations Research. Columbia University*.
- [27] Ferruci, F., Pro-active Dynamic Vehicle Routing. Operations: Real-Time Control and Request-Forecasting Approaches to Improve Customer Service, Springer, 2013.

[28] Lund, K., Madsen, O. B. G., and Rygaard, J. M., "Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism". *Technical report, IMM Institute of Mathematical Modelling*.

Apêndice A

Este apêndice apresenta o modelo matemático introduzido na seção 6.5 implementado na ferramenta IBM ILOG CPLEX (versão: 12.7.1.0).

```
// Parameters
int nSpot = ...;
range Platforms = 1..(nSpot);
range Platforms2 = 1..(2*nSpot);
float Dist[Platforms][Platforms] = ...;
float Dist2[Platforms2][Platforms2];
int y[Platforms2] = ...; // Auxiliary variable used to set regular visits to
the customers
int z[Platforms2] = ...; // Auxiliary variable used to set additional visits
to the customers, limited to two;
int i_1 = ...;
int i_2 = ...;
int i_3 = ...;
int i_4 = ...;
int i_5 = ...;
int i_6 = ...;
int i_7 = ...;
int i_8 = ...;
int i_9 = ...;
int i_10 = ...;
int i_11 = ...;
int i_12 = ...;
int i_13 = ...;
int i_14 = ...;
int i_15 = ...;
int i_16 = ...;
int i_17 = ...;
int i_18 = ...;
int i_19 = ...;
int i_20 = ...;
int i_21 = ...;
int i_22 = ...;
int i_23 = ...;
int i_24 = ...;
int i_25 = ...;
int j_1 = ...;
int j_2 = ...;
int j_3 = ...;
int j_4 = ...;
int j_5 = ...;
int j_6 = ...;
int j_7 = ...;
int j_8 = ...;
int j_9 = ...;
int j_10 = ...;
int j_11 = ...;
int j_12 = ...;
int j_13 = ...;
int j_14 = ...;
```

```

int j_15 = ...;
int j_16 = ...;
int j_17 = ...;
int j_18 = ...;
int j_19 = ...;
int j_20 = ...;
int j_21 = ...;
int j_22 = ...;
int j_23 = ...;
int j_24 = ...;
int j_25 = ...;
int i_cr = ...;
int j_cr = ...;

// Pre-processing: creating distance matrix (i = 1..2n; j = 1..2n)
execute DIST {
    for (var p in Platforms2)
        for (var s in Platforms2){
            if (p <= nSpot && s <= nSpot)
                Dist2[p][s]=Dist[p][s];
            if (p > nSpot && s <= nSpot)
                Dist2[p][s]=Dist[p-nSpot][s];
            if (p <= nSpot && s > nSpot)
                Dist2[p][s]=Dist[p][s-nSpot];
            if (p > nSpot && s > nSpot)
                Dist2[p][s]=Dist[p-nSpot][s-nSpot];
        }
    }

dvar boolean x[Platforms2][Platforms2]; // Decision variables
dvar float+ u[Platforms2]; // Subtour elimination variable

// Objective function
minimize
    sum (i in Platforms2, j in Platforms2 : i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
        Dist2[i][j] * x[i][j];

subject to {
    //Route restrictions based on previous interactions
    if (j_1 != 0){x[i_1][j_1] == 1;}
    if (j_2 != 0){x[i_2][j_2] == 1;}
    if (j_3 != 0){x[i_3][j_3] == 1;}
    if (j_4 != 0){x[i_4][j_4] == 1;}
    if (j_5 != 0){x[i_5][j_5] == 1;}
    if (j_6 != 0){x[i_6][j_6] == 1;}
    if (j_7 != 0){x[i_7][j_7] == 1;}
    if (j_8 != 0){x[i_8][j_8] == 1;}
    if (j_9 != 0){x[i_9][j_9] == 1;}
    if (j_10 != 0){x[i_10][j_10] == 1;}
    if (j_11 != 0){x[i_11][j_11] == 1;}
    if (j_12 != 0){x[i_12][j_12] == 1;}
    if (j_13 != 0){x[i_13][j_13] == 1;}
    if (j_14 != 0){x[i_14][j_14] == 1;}
    if (j_15 != 0){x[i_15][j_15] == 1;}
    if (j_16 != 0){x[i_16][j_16] == 1;}
    if (j_17 != 0){x[i_17][j_17] == 1;}
    if (j_18 != 0){x[i_18][j_18] == 1;}
    if (j_19 != 0){x[i_19][j_19] == 1;}
}

```

```

if (j_20 != 0){x[i_20][j_20] == 1;}
if (j_21 != 0){x[i_21][j_21] == 1;}
if (j_22 != 0){x[i_22][j_22] == 1;}
if (j_23 != 0){x[i_23][j_23] == 1;}
if (j_24 != 0){x[i_24][j_24] == 1;}
if (j_25 != 0){x[i_25][j_25] == 1;}

//Customer request (trip restriction)
if (i_cr != j_cr){ x[i_cr][j_cr] == 1; }

// Constraints (1) and (2) ensure that first node of each platform is visited once
// (1) Flow-in: ensure that vehicle arrives just once at first node of each customer
forall (j in Platforms2 : j < nSpot+1)
    sum (i in Platforms2 : i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
        x[i][j] == y[j];

// (2) Flow-out: ensure that vehicle leaves just once the first node of each customer
forall (i in Platforms2 : i < nSpot+1)
    sum (j in Platforms2 : i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
        x[i][j] == y[i];

// Constraints (3) and (4) ensure that second node of each platform is visited if so defined previously
// (3) Flow-in: ensure that vessel arrives just once at second node of each customer
forall (j in Platforms2 : j >= nSpot+1)
    sum (i in Platforms2 : i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
        x[i][j] == z[j-nSpot];

// (4) Flow-out: ensure that vessel leaves just once the second node of each customer
forall (i in Platforms2 : i >= nSpot+1)
    sum (j in Platforms2 : i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
        x[i][j] == z[i-nSpot];

// (5) Subtour elimination constraints
forall (i in Platforms2, j in Platforms2 : i > 1 && j > 1 && i != j && i != j+nSpot && j != i+nSpot)
    u[i] - u[j] + 2*nSpot*x[i][j] <= 2*nSpot-1;

}

execute RESULTS {
writeln (" ");
for (var i in Platforms2)
    for (var j in Platforms2)
        if (x[i][j] == 1){
            writeln("x["+i+"]["+j+"] == "+x[i][j]);
        }
}

```