



UM MODELO MATEMÁTICO MULTI TERMINAIS E UMA META-  
HEURÍSTICA *ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH* PARA O  
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE NAVIOS ALIVIADORES VISANDO O  
ESCOAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

Pedro da Matta e Andrade Basilio

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

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro

Abril de 2017

UM MODELO MATEMÁTICO MULTI TERMINAIS E UMA META-  
HEURÍSTICA *ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH* PARA O  
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE NAVIOS ALIVIADORES VISANDO O  
ESCOAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

Pedro da Matta e Andrade Basilio

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 DE TRANSPORTES.

Examinada por:

---

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

---

Prof. Hostilio Xavier Ratton Neto, Dr.

---

Prof. Virgilio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2017

Basilio, Pedro da Matta e Andrade

Um modelo matemático multi terminais e uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* para o problema de roteamento de navios aliviadores visando o escoamento de petróleo *offshore* / Pedro da Matta e Andrade Basilio. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XII, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 60-63.

1. Modelagem Matemática. 2. Otimização. 3. Escoamento de Petróleo *Offshore* 4. *Adaptive Large Neighborhood Search*. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha mãe Paula e ao meu Pai Fernando que, como engenheiros, ensinaram muito sobre a profissão, e me proporcionaram a ajuda e apoio para realização deste mestrado, sempre me incentivarem a estudar.

Também a minha namorada Leonella que esteve comigo em todos os momentos difíceis e alegres durante estes dois anos que foram, ao mesmo tempo, de grande aprendizagem e superação.

A toda a minha família por sempre me apoiarem em minhas decisões me incentivando a estudar e crescer como pessoa e profissional.

Agradeço aos amigos de infância que sempre estiveram ao meu lado e aos amigos que fiz no mestrado, pela troca de ideias e conhecimentos.

Agradeço também ao meu orientador Glaydston, que foi de grande importância para a realização deste trabalho. Ele que, sempre acreditando, criticando e ajudando conseguiu obter o melhor resultado de mim.

A toda equipe do PET por todo o apoio na secretaria e esclarecimentos sobre o programa e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio concedido.

Por fim aos professores Hostilio Ratton e Virgilio Ferreira por aceitarem participar da banca e apoiarem o aprimoramento da pesquisa.

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 MATEMÁTICO MULTI TERMINAIS E UMA META-  
HEURÍSTICA *ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH* PARA O  
PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE NAVIOS ALIVIADORES VISANDO O  
ESCOAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

Pedro da Matta e Andrade Basilio

Abril/2017

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

A cadeia produtiva de petróleo e gás natural apresenta grande complexidade e envolve um conjunto de etapas para se obter tal derivado. Pode-se destacar especialmente os serviços de apoio logístico à produção que devem prover respostas rápidas ao sistema da cadeia de produção, minimizando ao máximo os custos, desonerando a cadeia produtiva. Ressalta-se a importância dos FPSO (*Floating Production Storage Offloading*), navios, em geral de grande porte com capacidade de produzir, processar e armazenar o petróleo que é transferido para a terra por meio de navios aliviadores ou oleodutos. Neste contexto, o escoamento do petróleo por meio de navios aliviadores, aliado ao estabelecimento eficaz das rotas, mostra-se bastante relevante. Portanto, este trabalho apresenta um modelo matemático multi terminais para o problema de roteamento de navios aliviadores e uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) que é capaz de definir as rotas dos navios aliviadores ao menor custo possível. Os testes computacionais mostraram que o modelo matemático possui um desempenho melhor que um outro proposto na literatura e que a meta-heurística ALNS é capaz de encontrar boas soluções em um reduzido tempo computacional.

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

A MATHEMATICAL MULTI TERMINAL MODEL AND A  
METAHEURISTIC ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH FOR THE  
SHUTTLE TANKS ROUTING PROBLEM AIMING OIL FLOW OFFSHORE.

Pedro da Matta e Andrade Basilio

April/2017

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

The oil and natural gas production chain presents a large complexity and involves a set of steps to obtain such derivative. Particularly noteworthy are the logistics support services to production that must provide quick responses to the production system chain, minimizing costs. The importance of Floating Production Storage Offloading (FPSO), generally large vessels capable of producing, processing and storing the oil that is transferred to the land by shuttle tanks or by oil pipelines, is emphasized. In this context, the flow of oil by shuttle tanks, together with the effective establishment of the routes, is very relevant. Therefore, this work presents a multi-terminals mathematical model for the problem of shuttle tanks routing and an Adaptive Large Neighborhood Search meta-heuristic (ALNS) that is able to define shuttle tanks routes at a minimum cost. The computational tests showed that the mathematical model performs better than another proposed model in the literature and that the ALNS meta-heuristic is able to find good solutions in a reduced time.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Descrição do problema de pesquisa.....	3
1.2. Objetivos Geral e Específicos.....	5
1.4. Metodologia.....	6
1.4.1. Método de Pesquisa.....	6
1.5. Estrutura da Dissertação.....	7
2. A CADEIA DO PETRÓLEO.....	8
2.2. Lei do Petróleo, 9.478/97.....	10
2.3. Terminais.....	11
2.4. Características dos Navios Aliviadores.....	14
2.5. Processo de Escoamento de Petróleo <i>Offshore</i> Por Meio de Navios Aliviadores.....	18
2.6. Considerações Finais.....	20
3. NOVO MODELO MATEMÁTICO.....	21
3.1. Modelo Matemático Proposto por Meza <i>et al.</i> (2015).....	21
3.2. Novo Modelo Matemático.....	25
3.2.1. Estrutura da Rede.....	26
3.2.2. Vértices.....	26
3.3.3. Arcos.....	26
3.4. Considerações Finais.....	30
4. <i>ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH</i> PARA O PROBLEMA DE NAVIOS ALIVIADORES.....	31
4.1. Mecanismos e Funcionamento Geral do ALNS para o Problema de Roteamento de Navios Aliviadores.....	33
4.2.1. Solução Inicial.....	36
4.2.2. Heurísticas de Destruição (H <sup>-</sup> ) e de Reparação (H <sup>+</sup> ).....	36
4.3. Camada Adaptativa.....	38
4.4. Temperatura.....	39
4.8. Considerações Finais.....	40
5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	41
5.1. Informações Gerais.....	41
5.2. Comparação dos Modelos.....	43
5.3. Resultados do ALNS.....	50

5.3.1. Calibração dos Parâmetros .....	50
5.3.2. Resultados e Comparações .....	54
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	58
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
APÊNDICE I – DADOS DAS PLATAFORMAS .....	64
APÊNDICE II – GRÁFICOS DE RESULTADOS MEZA E MULTI .....	71
APÊNDICE III – TABELA DE RESULTADOS ALNS .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Apresentação dos Reservatórios Situados no Pré-Sal.....	1
Figura 2.1: Cadeia do Petróleo.....	8
Figura 2.2: Terminal de Angra dos Reis.....	12
Figura 2.3: Navio Suezmax.....	16
Figura 2.4: Navio Aframax.....	16
Figura 2.5: Navio Panamax.....	17
Figura 2.6: Operação <i>Offloading</i> .....	19
Figura 5.1: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 1.....	48
Figura 5.2: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 1.....	48
Figura 5.3: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 5.....	49
Figura 5.4: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 5.....	49
Figura 5.5: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 1.....	50
Figura 5.6: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 10.....	50
Figura 5.7: Comparação entre a função objetivo – 1 Terminal.....	54
Figura 5.8: Comparação entre a função objetivo – 2 Terminais.....	56
Figura II.1: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 2.....	71
Figura II.2: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 2.....	71
Figura II.3: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 3.....	72
Figura II.4: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 3.....	72
Figura II.5: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 4. ....	73
Figura II.6: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 4.....	73
Figura II.7: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 6. ....	74
Figura II.8: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 6.....	74
Figura II.9: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 7. ....	75

Figura II.10: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 7.....	75
Figura II.11: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 8. ....	76
Figura II.12: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 8.....	76
Figura II.13: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo proposto por Meza <i>et al.</i> (2015) – Instancia 9. ....	77
Figura II.14: Comparação de <i>upper</i> e <i>lower bound</i> do modelo multi – Instancia 9.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tancagem de Terminais.....	13
Tabela 2.2: Frota Brasileira de Navios Aliviadores.....	17
Tabela 5.1: Parâmetros dos Navios.....	41
Tabela 5.2: Dados das Plataformas.....	42
Tabela 5.3: Dados dos Navios – 1 Terminal.....	42
Tabela 5.4: Dados dos Navios – 2 Terminais.....	43
Tabela 5.5: Características do Modelo.....	44
Tabela 5.6: Relaxação de Programação Linear.....	45
Tabela 5.7: <i>Branch and Bound</i> .....	47
Tabela 5.8: Número de elementos removidos e reinseridos por iteração.....	52
Tabela 5.9: Número de Segmentos.....	53
Tabela 5.10: Número de Iterações.....	53
Tabela 5.11: Testes entre o Novo Modelo e o ALNS – Um Terminal.....	55
Tabela 5.12: Testes entre o Novo Modelo e o ALNS – Dois Terminais.....	57
Tabela I.1 – Dados de 12 plataformas.....	64
Tabela I.2 – Dados de 14 plataformas.....	64
Tabela I.3 – Dados de 16 plataformas.....	65
Tabela I.4 – Dados de 18 plataformas.....	65
Tabela I.5 – Dados de 20 plataformas.....	66
Tabela I.6 – Dados de 22 plataformas.....	67
Tabela I.7 – Dados de 24 plataformas.....	68
Tabela I.8 – Dados de 26 plataformas.....	69
Tabela I.9 – Dados de 28 plataformas.....	70
Tabela III.1 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 1 e 2 com apenas um terminal.....	78
Tabela III.2 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 3 e 4 com apenas um terminal.....	78
Tabela III.3 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 5 e 6 com apenas um terminal.....	79
Tabela III.4 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 7 e 8 com apenas um terminal.....	79

Tabela III.5 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 9 e 10 com apenas um terminal.....	80
Tabela III.6 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 1 e 2 com apenas dois terminais.....	80
Tabela III.7 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 3 e 4 com apenas dois terminais.....	81
Tabela III.8 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 5 e 6 com apenas dois terminais.....	81
Tabela III.9 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 7 e 8 com apenas dois terminais.....	82
Tabela III.10 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 9 e 10 com apenas dois terminais.....	82

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera é considerada uma das maiores indústrias do mundo, fazendo com que grandes investimentos sejam feitos em toda a sua cadeia. Devido às últimas descobertas de reservas de petróleo na camada pré-sal na costa Brasileira, tais investimentos têm crescido por meio, principalmente, da Petrobras S.A., no Brasil.

Segundo o Relatório de Impacto Ambiental – Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Polo Pré-Sal da Bacia de Santos – Etapa 2 (RIMA, 2013), a camada de pré-sal possui uma área de 800 quilômetros de comprimento e 200 quilômetros de largura e está localizada entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo. O volume de produção de petróleo esperado é tão significativo que a produção no Brasil poderá dobrar nos próximos 10 anos. A Figura 1.1 aponta as bacias de Santos e Campos onde estão situados os reservatórios do Pré-Sal e onde estão localizadas as principais operações de produção de petróleo *offshore* no Brasil.

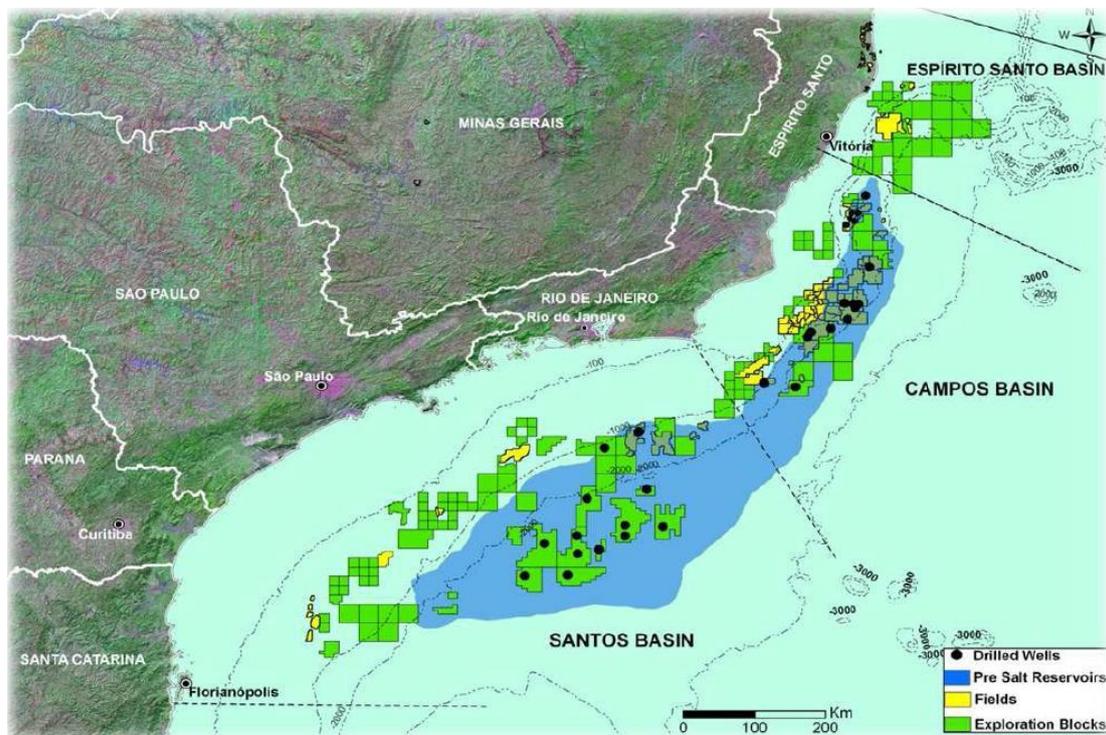


Figura 1.1: Apresentação dos Reservatórios Situados no Pré Sal  
Fonte: Petrobras (2015)

De acordo com a Petrobras (2005), de 2010 a 2014 a média anual de produção diária do pré-sal cresceu quase 12 vezes, passando de 42 mil barris/dia em 2010 para 492 mil barris/dia em 2014.

Segundo o RIMA (2013), para produção na camada do pré-sal a Petrobras adotou plataformas do tipo *Floating Production Storage Offloading* (FPSO) devido a sua facilidade de armazenagem de óleo em mar e ao seu sistema de ancoragem, optando, então, pela utilização de navios do tipo “aliviadores” para realização do escoamento aos terminais.

Segundo Silva (2015), a operação de escoamento conta com o envolvimento de três diferentes organizações da Petrobras. A Divisão de Exploração e Produção (E&P), representada pelas plataformas, dutos submarinos e serviços relacionados com exploração e produção; a Divisão de Abastecimento, que cuida da logística de distribuição e transporte, e a – Transpetro – que administra os ativos de transporte: diversos tipos de embarcações, dutos terrestres, frotas de caminhão, transporte ferroviário e terminais.

Não se pode ignorar que a Petrobras é uma empresa estatal, portanto tem toda uma estratégia de assegurar fornecimento de combustível e demais derivados em todo território nacional. Este fator faz com que, em um país de dimensões continentais, um grande esforço logístico seja exigido.

Neste contexto, este trabalho limita-se ao segmento *midstream* no que diz respeito ao transporte do petróleo produzido nas Unidades de Exploração e Produção (UEPs). De maneira geral, este petróleo pode ser transportado por meio de dutos ou navios aliviadores (Silva, 2004). No caso dos navios aliviadores, estas unidades de transporte coletam o óleo produzido e o transferem para terminais terrestres localizados, normalmente, na costa.

Os navios aliviadores são veículos transportadores de alto custo que precisam ser utilizados de maneira eficiente para que o custo envolvido seja minimizado. Sendo assim, uma forma de utilização adequada proposta por Meza *et al.* (2015) consiste em realizar rotas de coleta. Nesta proposta, um navio aliviador deixa o terminal e segue até os locais de produção para coletar o óleo produzido e retornar ao terminal, formando uma rota. Os

navios aliviadores podem estar concentrados em um único terminal ou ainda em vários terminais localizados na costa.

Este problema tem relação com o clássico Problema de Roteamento de Veículos (PRV). O PRV considera que veículos devem deixar um depósito e seguir até alguns clientes para realizar coletas de produtos, retornando ao ponto inicial. No PRV busca-se minimizar o custo total das rotas; situação semelhante ao do problema definido por Meza *et al.* (2015) que, por sua vez, tem como objetivo encontrar rotas para os navios ao menor custo possível. Meza *et al.* (2015) propuseram um modelo matemático de programação linear inteira mista para o problema no qual os navios aliviadores estão posicionados em um único terminal, porém em situações reais, esses navios podem estar localizados em diferentes terminais ao longo da costa.

No entanto, os PRV's são do tipo NP-hard, ou seja, de difícil trato computacional (o tempo computacional necessário para resolvê-lo cresce exponencialmente com o aumento do número de pontos a serem visitados), característica também presente no problema de roteamento de navios aliviadores. Assim sendo, a utilização de métodos exatos para encontrar a melhor solução se torna, muitas vezes, inviável para algumas instâncias.

Com isso, heurísticas e meta-heurísticas para o PRV estão presentes na literatura, tais como: *Ant Colony* (Reimann *et al.*, 2004); *Memetic Algorithm* (Prins, 2004; Nagata, 2007; Nagata e Braysy, 2009); *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP* (Prins, 2009); *Genetic Algorithm* (Vidal *et al.*, 2012); entre outras.

Sendo assim, este trabalho tem o objetivo de propor um novo modelo matemático multi terminais, bem como uma meta-heurística *Adaptative Large Neighborhood Search (ALNS)* para o problema de roteamento de navios aliviadores, visando o escoamento de petróleo.

### **1.1. Descrição do problema de pesquisa**

Segundo Meza *el. al.* (2015), nos últimos anos, devido à crescente demanda por petróleo e seus derivados, o mercado tem se tornado cada vez mais competitivo, fazendo com que as empresas do ramo busquem estratégias para melhorar seus resultados.

O grande desafio para as empresas é reduzir custos e tempo para realização da operação de escoar petróleo das plataformas, decidindo o melhor percurso para os navios tanques que realizam o escoamento do óleo das plataformas até os terminais e clientes, atendendo às necessidades do consumidor final.

No caso do Brasil, identifica-se que a maioria das plataformas utilizadas são do tipo FPSO (*Floating Production Storage Offloading*). Em geral os FPSO são navios de grande porte do tipo VLCCs (*Very Large Crude Carriers*) com capacidade de produzir, processar e armazenar o petróleo, pois possuem uma planta de processo instalada.

Segundo Basilio *et. al.* (2015), na medida em que o petróleo é produzido vai sendo armazenado e de tempos em tempos deve ser escoado, evitando-se que chegue ao limite máximo de armazenamento para que não venha ocorrer uma parada na produção. O processo de transferência do petróleo para o navio aliviador denomina-se *Operação Offloading*.

Neste problema considera-se o raciocínio de que o ideal é que as plataformas funcionem com menor nível de estoque, acarretando com isso uma maior frequência de escoamento, o que minimiza o custo e evita que se chegue a uma parada de produção.

Para definir as rotas dos navios aliviadores, deve-se levar em consideração os seguintes aspectos:

- Os tipos de navios aliviadores disponíveis para o transporte de petróleo. Para este tipo de problema considera-se basicamente três tipos: *Panamax*, *Suezmax* e *Aframax*;
- A localização dos navios plataforma, neste caso apenas os FPSO;
- Os prazos máximos previstos para o escoamento da produção das plataformas de forma a não comprometer a operação de produção, considerando que a indústria petrolífera é de produção contínua. Por tal motivo, busca-se evitar que o sistema de produção das unidades seja comprometido, ou seja, que atinja sua capacidade máxima;

- Os procedimentos da empresa com relação à operação de *offloading*. Neste sentido, deve-se evitar que o navio chegue antes da data programada para que o volume de óleo escoado não seja menor do que o programado. Assim, caso o navio aliviador chegue antes da data programada, faz parte da política forçar que ele fique parado até a data definida;
- As multas a serem pagas caso não seja possível atender as plataformas dentro dos prazos; e
- Os tempos de cada atividade no processo de escoamento, como por exemplo: aproximação, atracação, transferência do óleo, desatracação, afastamento; e outras.

Vale ressaltar que fatores da natureza como chuvas, condições marítimas ou fatores humanos devem ser considerados separadamente.

## 1.2. Objetivos Geral e Específicos

No contexto apresentado, o presente trabalho tem como objetivo estudar o escoamento de petróleo por meio de navios aliviadores nos campos *offshore*, com a aplicação de um novo modelo matemático de programação linear inteira mista capaz de otimizar o roteamento destes navios, a partir de vários terminais, de forma a não permitir a ocorrência de parada de produção nas plataformas envolvidas, diminuindo os custos da operação. Dada a dificuldade para resolver este modelo de forma exata, principalmente em instâncias de grande porte, busca-se também apresentar uma meta-heurística ALNS para o problema.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Conceituar e entender a cadeia de suprimentos do petróleo, dando ênfase ao transporte de petróleo por meio de navios aliviadores;
- Criar um novo modelo matemático capaz de atender plataformas a partir de diversos terminais;
- Elaborar testes com um novo modelo matemático de programação linear inteira que possibilite um menor custo da operação de escoamento de petróleo por meio de navios aliviadores;
- Comparar o novo modelo com o de *Meza et al.* (2015) por meio de testes computacionais;

- Implementar o ALNS para resolução do problema citado; e
- Avaliar a capacidade da meta-heurística ALNS na resolução de problemas com dimensões reais.

## **1.4. Metodologia**

### **1.4.1. Método de Pesquisa**

Para este trabalho aplica-se o método de pesquisa por meio hipotético dedutivo, buscando-se através de premissas e hipóteses uma verdade. O método a ser aplicado procura, por meio de revisão bibliográfica e pesquisa de dados, obter um modelo matemático que possibilite otimizar o transporte de petróleo por meio de navios aliviadores até os terminais de descarga.

Portanto, o primeiro passo foi buscar na literatura algumas abordagens ao problema do escoamento de navios aliviadores para, assim, compreender melhor o problema. Após esta etapa, buscou-se na bibliografia estudos sobre a cadeia do petróleo visando entender as particularidades da indústria e o processo de escoamento de petróleo por meio de navios aliviadores para melhor compreensão do funcionamento da operação como um todo.

Como pesquisa bibliográfica também buscou-se um melhor entendimento a respeito dos PRV's, visando associar este tipo de problema ao problema de roteamento de navios aliviadores para o escoamento de petróleo *offshore*. Tal pesquisa incluiu desde problemas de roteamento mais simples até o problema com múltiplos depósitos, que foi estudado a fundo para a criação do novo modelo envolvendo diversos terminais de atracação para os navios aliviadores.

Como os PRV's são comumente do tipo *NP-hard*, buscou-se uma meta-heurística que já tivesse sido utilizada para alguns problemas e que pudesse também ser aplicada ao problema sugerido. A meta-heurística escolhida foi o *Adaptive Larger Neighborhood Search* (ALNS) que, conforme visto na literatura, possui a capacidade de gerar boas soluções.

Após as pesquisas bibliográficas, o trabalho seguiu para a criação de um novo modelo matemático capaz de atender o esperado para o problema, tomando por base o modelo

proposto por Meza *et. al.* (2015). Foram realizados testes e comparações entre os dois modelos.

Como próximo passo, foi aplicada a meta-heurística ALNS em algumas instâncias de grande porte e os resultados foram comparados com os do *solver* CPLEX 12.5 (IBM, 2012)

Por fim, foram verificados os resultados e geradas as conclusões descritas ao final deste trabalho.

### **1.5. Estrutura da Dissertação**

Este trabalho está dividido em seis capítulos que descrevem e analisam o problema citado. O Capítulo 2 apresenta uma contextualização do uso de navios aliviadores para escoamento de petróleo *offshore* na cadeia do petróleo, além de também explicar a operação *offloading*.

O Capítulo 3 descreve o problema do roteamento de navios aliviadores à luz do modelo proposto por Meza *et. al.* (2015), apresenta uma contextualização do modelo multi terminais e, por fim, expõe o novo modelo matemático para o problema.

O Capítulo 4 apresenta a meta-heurística ALNS para resolução do problema. Inicia-se com uma introdução sobre o ALNS e em seguida os principais elementos do ALNS são definidos, bem como o algoritmo principal.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos testes computacionais e uma comparação entre o modelo matemático de Meza *et. al.* (2015) e o novo modelo proposto. Este capítulo também retrata a comparação entre o ALNS e o novo modelo demonstrando como o ALNS se comportou face às instâncias sugeridas. Por fim, propõe-se um pequeno estudo de caso com localizações aproximadas de terminais e plataformas.

O último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, que destaca os objetivos alcançados e propõe novos estudos sobre o tema.

## 2. A CADEIA DO PETRÓLEO

Segundo Farah (2012), o petróleo tornou-se indispensável para a sociedade desde a sua descoberta em quantidades comerciais. Automóveis, trens, navios e aviões são movidos pela energia gerada pela combustão de seus derivados, estradas são construídas usando asfalto com matéria-prima derivada do petróleo e tantos outros produtos são constituídos por este elemento.

O estudo da cadeia do petróleo é extremamente particular devido a sua dimensão e complexidade, mas também pelas características econômicas, físicas e técnicas do petróleo. Estas características refletem em uma forma organizacional estruturada por diferentes segmentos de atividade em cadeia integrada verticalmente como forma de distribuir riscos e custos entre os seus vários segmentos e de obter redução da relação risco/custo médio que compense os diferenciais de custos e aumente os ganhos ao longo dos segmentos da indústria. A Figura 2.1 ilustra a cadeia do petróleo com suas segmentações e agentes.

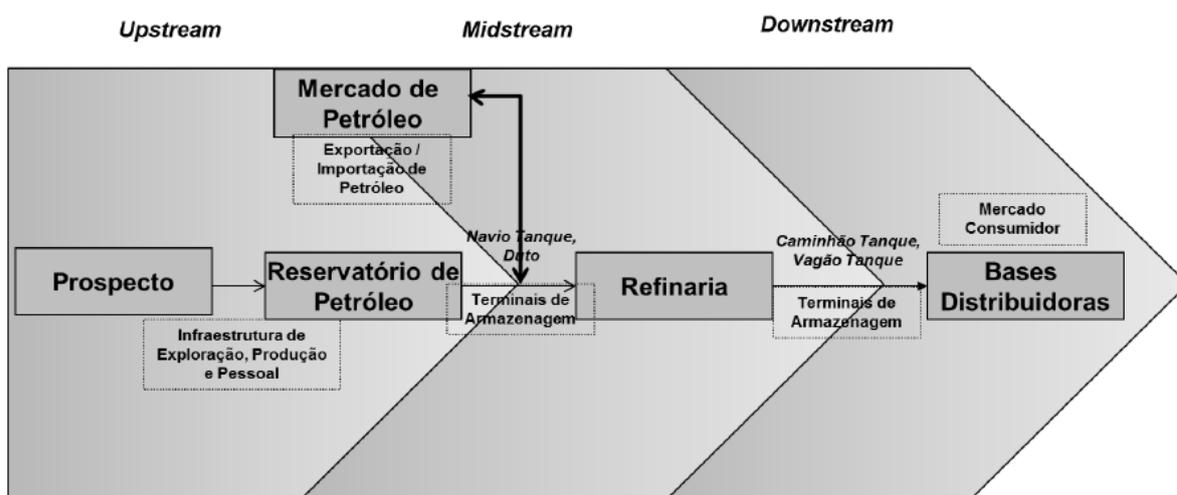


Figura 2.1: Cadeia do Petróleo  
Fonte: Ferreira Filho (2016)

Tais segmentos são tradicionalmente classificados como: *upstream* (o segmento extrativista) que está relacionado às atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural e *downstream*, (o segmento industrial) que compreende as atividades de refino, transporte e a importação e exportação de gás natural, petróleo e seus derivados e

a distribuição e revenda de derivados. Recentemente, porém, tem sido utilizado o termo *midstream* para o abastecimento (transporte e importação de petróleo) e o refino, ficando o termo *downstream* restrito às etapas de distribuição e revenda de derivados. Segundo Ferreira Filho (2016), os três segmentos podem ser assim definidos:

- *Upstream:*

Abrange as operações que vão desde a prospecção para identificação de jazidas de óleo, até o seu processamento primário para separar o petróleo do gás natural e de impurezas. Compreende também o armazenamento do petróleo antes de ser transferido para as refinarias e as atividades de exploração, perfuração de poços e produção;

- *Midstream:*

Consiste no conjunto de operações para obtenção das matérias-primas (diversos tipos de petróleo) seja de fontes internas à companhia ou obtidos por compra e de refino onde estes petróleos são transformados em produtos derivados com especificações bem caracterizadas e adequados a finalidades específicas (gasolina, diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene, entre outros). Compreende, basicamente, as atividades de compra e venda de petróleo, seu transporte, armazenamento e refino; e

- *Downstream:*

Ocupa-se das tarefas logísticas necessárias para transportar os produtos desde a refinaria até os clientes finais, levando em conta fatores como a rapidez na entrega do produto ao cliente, o tipo de produto transportado e a característica do transporte a ser utilizado em função das particularidades da carga, que muitas vezes envolve o manuseio de produtos perigosos e inflamáveis. Os produtos derivados do petróleo, como, por exemplo, a gasolina e o óleo diesel, ao saírem da refinaria produtora, fluem através de um “canal de distribuição” que envolve bases primárias e secundárias de armazenamento, até chegarem aos postos de serviço. Assim este segmento compreende as atividades de transporte, distribuição e comercialização.

## **2.2. Lei do Petróleo, 9.478/97**

A década de 1990 foi muito importante para a indústria de petróleo no Brasil, primeiro por novas descobertas de óleo na Bacia de Campos e depois, pela nova regulamentação advinda da Lei 9.478/97 que decretou o fim do monopólio da Petrobras na indústria petroquímica.

O monopólio estatal da Petrobras permaneceu até a promulgação da Lei Federal no. 9.478 de 1997 – a Lei do Petróleo – que traz modificações institucionais e legais significativas para a indústria do petróleo. Esta lei “dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências” (Lei Federal no 9.478/97) (Lustosa, 2002).

Chamada de Lei do Petróleo, a Lei no. 9.478/97 estabeleceu em seu Artigo 1º os objetivos básicos que norteiam a política energética nacional, que inclui, além do petróleo, a energia elétrica e o gás natural, caracterizando-se como uma política nacional de abastecimento. O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) foi criado por esta mesma lei, “... vinculado à Presidência da República e presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, com a atribuição de propor ao Presidente da República políticas nacionais e medidas específicas ...” (Art. 2o). O CNPE foi regulamentado posteriormente, pelo Decreto Federal no 3.520/00, que estabeleceu sua composição (Lustosa, 2002).

Portanto, como estabelecido pelo Art. 20 da Constituição Federal, os depósitos de hidrocarbonetos fluidos existentes no território nacional pertencem à União. Esta também detém o monopólio (Art. 177 da Constituição Federal) das atividades de pesquisa e lavra de jazidas de hidrocarbonetos fluidos, refino do petróleo, exportação e importação destes hidrocarbonetos e seus derivados, e o transporte (marítimo ou por duto) de petróleo.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) foi criada como órgão regulador da indústria do petróleo e vinculado ao Ministério de Minas e Energia. A agência reguladora ficou responsável, portanto, pela regulação, contratação e fiscalização das atividades petrolíferas. Cabe, portanto, à ANP a administração dos direitos de exploração e produção de petróleo e gás natural, realizando licitações e celebrando os contratos de concessão das

atividades do *upstream*, inclusive a manutenção, coleta e administração do acervo técnico sobre as bacias sedimentares brasileiras. A ANP também concede as autorizações para construção, ampliação e operação de refinarias; estocagem, construção de instalação, efetuação de transporte, importação e exportação de petróleo, derivados, gás natural e condensado.

Em termos de capacitação tecnológica para o setor petróleo, a Lei do Petróleo estabeleceu que parte dos *royalties* arrecadados com a lavra em plataforma continental devem ser destinados ao Ministério de Ciência e Tecnologia para financiar programas de amparo à pesquisa científica e ao desenvolvimento tecnológico aplicados à indústria do petróleo (Lei Federal no 9.478/97, art. 49). Sendo assim, tornou-se outra fonte de financiamento para o desenvolvimento tecnológico no setor, que antes ficava quase que exclusivamente a cargo da Petrobras.

Além da Lei do Petróleo, outra mudança legal afetou a indústria do petróleo: a regulação ambiental. Há dois marcos importantes: o primeiro é a Lei Federal no 9.605/98, também conhecida como Lei de Crimes Ambientais, que prevê sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, tanto para o poluidor quanto para o órgão regulador que se omitir diante de crimes ambientais.

Portanto a Lei do Petróleo trouxe mudanças significativas para a indústria petrolífera brasileira ocasionando um grande crescimento tanto na indústria quanto no próprio Brasil.

### **2.3. Terminais**

Segundo Soares *et al.* (2003), a função dos terminais de armazenagem é viabilizar a movimentação de petróleo e seus derivados, compreendendo um conjunto de instalações utilizadas para o recebimento, expedição e armazenagem de produtos da indústria de petróleo podendo ser classificado em marítimo, lacustre, fluvial ou terrestre.

De acordo com Rangel (2009), os terminais de distribuição e armazenamento destacam-se pelas seguintes atividades: armazenamento de derivados de petróleo e álcool em tanques apropriados, descargas de navios-tanque por meio de oleodutos, carga e descarga de balsas-tanque com auxílio de oleodutos, cargas e descargas de caminhões-tanque

através de plataformas de enchimentos de caminhões tanques; carga, armazenamento e descarga de óleos e lubrificantes.

Para ter acesso aos terminais, utiliza-se principalmente a malha rodoviária. Segundo Soares (2003), os modos rodoviários e ferroviários são bastante utilizados na transferência de produtos entre as bases primária e secundária, principalmente no que diz respeito a distribuição. No caso do modo rodoviário, o principal veículo transportador é o caminhão tanque.

No caso de terminais que recebem petróleo por meio de navios aliviadores, estes devem ter propriedades para atracar o navio de forma que o calado seja grande o suficiente para que não ocorra nenhum acidente. No Brasil, pode-se citar como exemplo o terminal de Angra dos Reis, como mostrado na Figura 2.2, e atende às refinarias de Duque de Caxias (RJ) e Gabriel Passos (MG).



Figura 2:2:Terminal de Angra dos Reis  
Fonte: Petrobras (2015)

Segundo a Transpetro S.A. os dados de tancagem dos terminais aquaviários do Brasil seguem conforme Tabela 2.1. Nota-se que são 25 terminais localizados em diversos estados da federação que podem armazenar derivados de petróleo e GLP. O terminal de São Sebastião localizado no Estado de São Paulo possui a maior capacidade total da ordem de 2 milhões TPB (Tonelagem por Porte Bruto).

Tabela 2.1:Tancagem de Terminais  
 Fonte: Transpetro (2015)

<b>Terminal</b>	<b>UF</b>	<b>Derivados</b>	<b>Petróleo</b>	<b>GLP</b>	<b>Total (TPB)</b>
Angra dos Reis	RJ	132.489	845.577		978.066
Aracaju	SE		155.788		155.788
Barra do Riacho	ES	62.988		9.633	72.621
Belém	PA	37.899		6.360	44.259
Cabedelo	PB	10.022			10.022
Guamaré	RN	21.453	190.142		211.595
Ilha D'Água	RJ	165.056			165.056
Ilha Redonda	RJ			33.563	33.563
Macapá	AP	6.000			6.000
Maceió	AL	30.049	26.155		56.204
Madre de Deus	BA	604.079		52.611	656.690
Natal	RN	26.642			26.642
Niterói	RS	15.656			15.656
Norte Capixaba	ES		78.000		78.000
Osório	RS	192.159	509.000		701.159
Paranaguá	PR	194.602		9.532	204.134
Rio Grande	RS	61.299			61.299
Santos	SP	263.134		83.002	346.136
São Francisco do Sul	SC		466.622		466.622
São Luis	MA	71.290		4.800	76.090
São Sebastião	SP	426.326	1.585.345		2.011.671
Solimões	AM	275	60.000	19.551	79.826
Suape	PE	104.864		15.940	120.804
Vitória	ES	11.000			11.000
<b>Total</b>		<b>2.437.282</b>	<b>3.916.629</b>	<b>234.992</b>	<b>6.588.903</b>

## 2.4. Características dos Navios Aliviadores

Segundo Yergin (2012), em meados do século XIX, no início da indústria devido à dificuldade em obter madeira para fabricação de barris para transporte de petróleo na Rússia, a empresa Nobel de exploração e produção de petróleo encomendou a construção de um navio capaz de realizar o transporte do petróleo no Mar Cáspio entre Baku e Astrakan. Foi então construído o primeiro navio petroleiro batizado de *Zoroaster* com 56 metros de comprimento com capacidade de transportar 242 toneladas de petróleo e derivados em dois tanques de carga.

Estes navios de casco simples, movidos a vapor e com auxílio de velas foram utilizados até 1903, quando Ludiwig então presidente da empresa Nobel encomendou o primeiro navio-tanque com propulsão diesel-elétrica e capacidade para transportar 750 toneladas de óleo (Yergin, 2012).

Segundo Saraceni (2006), o porte dos navios petroleiros não cresceu até a Segunda Guerra Mundial, já que estes eram alvos fáceis. Após o término da guerra, a indústria foi impulsionada pelo aumento da demanda mundial por óleo e pelo descobrimento de novas jazidas no Golfo Pérsico. Com isso, os navios tornaram-se maiores e mais velozes.

Em 1958 foi construído no Japão o primeiro navio com uma capacidade superior a 100.000 toneladas e a partir daí iniciou-se a construção de navios ainda maiores com capacidade de 200.000 e 250.000 toneladas denominados os VLCCs .

Seguiu-se a construção de navios denominados ULCCs (*Ultra Large Crude Carriers*) que possuem capacidade para o transporte de mais de 300.000 toneladas de óleo. Surgiram então outras questões relacionadas aos terminais e portos devido a pouca profundidade para a atracação de navios deste porte, bem como a passagem por alguns canais, fazendo com que fossem estabelecidas rotas específicas.

No Brasil a indústria do petróleo começou a se desenvolver a partir de 1950 com a criação da Frota Nacional de Petroleiros (FRONAPE) pelo então presidente, Eurico Gaspar Dutra. A FRONAPE tinha a responsabilidade de operar o transporte de petróleo e

derivados dentro e fora do Brasil, podendo ainda armazenar e comercializar. (TRANSPETRO, 2016)

Com a criação da Petrobras em 1953, foi instituído, por meio da Lei nº 2004/1953, o monopólio da indústria. Toda pesquisa, lavra, refino e transporte de petróleo e derivados passaram a ser responsabilidade da Petrobras e FRONAPE, sendo que esta última passou a executar todo o tipo de atividade marítima no Brasil relacionada ao petróleo, desde cabotagem até o transporte de longo-curso nas importações e exportações.

Em 1970, o então presidente General Emílio Garrastazu Médici determinou que a FRONAPE ampliasse sua área de atuação, englobando as áreas de minérios e produtos químicos.

Em 1998 ocorreu a extinção da FRONAPE e foi criada a Transpetro S.A., uma subsidiária da Petróleo Brasileira S.A. atendendo a regulamentação dada pela Lei 9.478/97. Atualmente a Transpetro S.A. possui uma frota constituída por 52 navios, entre eles os navios *Suezmax*, *Aframax*, *Panamax*.

Os navios aliviadores são embarcações que possuem DP – *Dynamic Position* (Posicionamento Dinâmico), o que possibilita manter uma posição estacionária, trazendo maior rapidez e segurança de manobra na realização de operações *Offloading*. Atualmente são utilizados três tipos de navios para realizar o escoamento do petróleo:

- ***Suezmax***: Os navios tipo *Suezmax* transportam óleo cru e têm capacidade de carregamento entre 140.000 a 175.000 TPB (Tonelagem por Porte Bruto). O nome *Suezmax* foi adotado pelo fato do navio atender as limitações de 48 metros de comprimento e calado de 17 metros do Canal de Suez, no Egito. A Figura 2.3 a seguir demonstra o navio *Suezmax*;



Figura 2.3: Navio Suezmax  
 Fonte: Petrobras (2015)

- **Aframax:** Os navios tipo *Aframax* transportam óleo cru e tem capacidade de carregamento entre 80.000 e 120.000 TPB. O nome *Aframax* vem da terminologia *Average Freight Rate Assessment* (Valor Médio de Frete). A Figura 2.4 demonstra o navio *Aframax*; e



Figura 2.4: Navio Aframax  
 Fonte: Petrobras (2015)

- **Panamax:** Os navios tipo *Panamax* transportam óleo cru e produtos escuros tendo capacidade de carregamento entre 65.000 e 80.000 TPB. O nome *Panamax* foi

adotado pelo fato do navio atender às limitações da passagem do Canal do Panamá. A seguir na Figura 2.5 demonstra o navio *Panamax*.



Figura 2.5: Navio Panamax  
Fonte: Petrobras (2015)

Atualmente a frota de navios aliviadores brasileira consiste em 13 navios distribuídos entre os três tipos, conforme o Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Frota Brasileira de Navios Aliviadores  
Fonte: Transpetro (2015)

Nome	Construção	País de Origem	Porte Bruto (DWT)	Tipo
Ataulfo Alves	2000	Coreia do Sul	153.000	Suezmax
Cartola	2000	Coreia do Sul	153.000	Suezmax
Gothenburg	2006	Coreia do Sul	152.000	Suezmax
Stavanger	2003	Coreia do Sul	148.700	Suezmax
Nordic Brasilia	2003	Coreia do Sul	152.000	Suezmax
Nordic Rio	2004	Coreia do Sul	152.000	Suezmax
Nordic Spirit	2001	Coreia do Sul	152.000	Suezmax
Stena Spirit	2001	Coreia do Sul	152.000	Suezmax
Fortaleza Knusten	2011	China	105.000	Panamax
Navio Bergen	2000	Japão	105.200	Panamax
Recife Knutsen	2011	China	105.000	Panamax
Dan Cisne	2011	China	59.300	Aframax
Dan Sabiá	2010	China	59.300	Aframax

O Quadro 2.2 demonstra que dos treze navios da frota brasileira, oito são do tipo Suezmax construídos todos na Coreia do Sul com porte bruto variando entre 148.700 e 153.000, três são do tipo Panamax construídos na China e Japão com porte bruto de 105.000 e por fim dois do tipo Aframax construídos na China com porte bruto de 59.300.

## **2.5. Processo de Escoamento de Petróleo *Offshore* Por Meio de Navios Aliviadores**

A Operação *Offloading* consiste na transferência do petróleo de navios plataforma dos tipos FPSO e FSO (*Floating Storage Offloading*), embarcações de estocagem, para navios aliviadores que realizam o transporte do petróleo para os terminais marítimos. A diferença entre os navios FPSO e os FSO é que os últimos são unidades apenas de estocagem de óleo que ficam normalmente localizadas próximo às Unidades de Exploração e Produção (UEP) (Silva, 2005).

Em geral, os FPSO são de grande porte, do tipo VLCCs com capacidade de produzir, processar e armazenar o petróleo, pois possuem uma planta de processo instalada. Além disso, os FPSO são, em sua maioria, navios tanque antigos que foram convertidos em unidades estacionárias de produção e armazenamento de óleo no mar.

Estes navios são posicionados em locais conhecidos e possuem um sistema de ancoragem específico, definido como um conjunto de elementos estruturais capazes de manter uma determinada unidade flutuante em posição de equilíbrio. Tal sistema é composto por linhas de ancoragem que conectam a unidade flutuante às fundações em leito marinho.

Segundo Silva (2005), a operação *offloading* pode ser dividida em 14 etapas, iniciando-se com um navio saindo do seu ponto de partida e retornando ao mesmo ponto. A Figura 2.6, demonstra a realização da operação *offloading*.



Figura 2.6: Operação *Offloading*  
Fonte: RIMA (2013).

A operação *offloading* pode ser descrita da seguinte maneira:

1. A embarcação de alívio se aproxima da plataforma a uma baixa velocidade, após a autorização da programação;
2. É feita a conexão do navio aliviador com a plataforma através da passagem de cabos guias e dos mangotes;
3. É feita a conexão do mangote de carregamento e realizado o teste hidrostático;
4. Inicia-se a transferência do óleo. O comando desse processo é dado pela plataforma, por meio de equipamentos de bombeio, sistema de exportação e do sistema de geração de energia;
5. É realizada a desconexão do mangote;
6. É efetuada a retirada do mangote e do cabo;
7. Inicia-se a viagem até o terminal marítimo determinado para descarga;
8. Aguardo da autorização para atracação no terminal;
9. Aproximação até o cais de atracação com apoio de rebocadores quando uma equipe especializada assume o comando do navio na atracação;
10. Atracação no cais;
11. Conexão dos mangotes e testes de pressão;

12. Transferência do óleo para os tanques do terminal, sendo a operação feita pelo navio por possuir um sistema de bombeio específico para essa finalidade;
13. Terminado o descarregamento, o navio é retirado do terminal por navios rebocadores; e
14. Viagem de volta ao ponto de partida.

Segundo Silva *et al.* (2011), este tipo de operação totaliza em média um carregamento de 245.310 barris, cerca de 39.000 m<sup>3</sup> de petróleo. A taxa de transferência do óleo de uma embarcação para outra é a partir de 1.000 m<sup>3</sup>/h com duração de 20 a 36 horas.

## **2.6. Considerações Finais**

Este capítulo descreveu e analisou toda a cadeia do petróleo focando principalmente no escoamento de petróleo por meio de navios aliviadores. A conceituação desta indústria e o processo de escoamento são importantes para o entendimento do novo modelo proposto neste trabalho.

### 3. NOVO MODELO MATEMÁTICO

Este capítulo inicialmente apresenta o modelo matemático de Meza *et al.* (2015) e, em seguida, apresenta o novo modelo matemático proposto para realização da programação de navios aliviadores para escoamento de petróleo *offshore*, que é mais flexível por considerar múltiplos terminais, ou seja, um determinado navio aliviador pode deixar um terminal e retornar até o mesmo ainda retornar para um outro terminal. Essa flexibilidade é importante para melhorar a utilização da frota, bem como as atividades *offshore*.

#### 3.1. Modelo Matemático Proposto por Meza *et al.* (2015)

Na literatura foi possível encontrar apenas um modelo matemático, criado por Meza *et al.* (2015), que se aplica ao problema estudado nesta dissertação. Tal modelo pode ser representado por meio de um grafo não direcionado  $G(V, A)$  onde  $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  é o conjunto dos vértices ou nós e  $A = \{(i, j) : i, j \in V\}$  é o conjunto de arcos. Neste caso, os nós representam o terminal ou as plataformas e os arcos os possíveis deslocamentos dos navios aliviadores. As demandas são diferentes para cada plataforma e o terminal é o ponto de partida e chegada (vértice  $1 \in V$ ) dos navios usados para a coleta do petróleo.

A cada arco  $(i, j) \in A$  está associada uma distância  $d_{ij}$  que representa a distância entre os vértices  $i \in V$  e  $j \in V$ . Cada plataforma possui duas janelas de tempo contínuas. Caso o navio aliviador comece a operação na primeira janela de tempo não há penalidade aplicada, no entanto, se começar na segunda janela de tempo, uma penalidade é imposta. Com isso, a seguir são apresentados os demais conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão utilizadas no modelo matemático.

#### Conjuntos e Parâmetros:

$C$ : Subconjunto de  $V$  que representa somente as plataformas  $(2, \dots, n)$ , ou seja,  $C = \{2, 3, \dots, n\}$ . O terminal é representado pelo vértice 1, com isso  $V = C \cup \{1\}$ .

$K$ : Conjunto de navios disponíveis.

$T$ : Conjunto dos tipos de navios disponíveis.

$aut$ : Autonomia dos navios igual a 480 horas.

$tipo_k$ : Tipo do navio  $k \in K$ .

$cap_t$ : Capacidade do navio tipo  $t \in T$ .

$vel_t$  : Velocidade do navio tipo  $t \in T$ .

$comp_t$  : Consumo do navio tipo  $t \in T$  quando parado.

$conn_t$  : Consumo do navio tipo  $t \in T$  quando navegando.

$dem_i$  : Demanda da plataforma  $i \in C$ .

$e_i$  : Instante inicial da janela de tempo da plataforma  $i \in C$ .

$l_i$  : Instante final da janela de tempo da plataforma  $i \in C$  sem penalidade.

$q_i$  : Instante final da janela de tempo da plataforma  $i \in C$  com penalidade.

$ta_i$  : Tempo de atendimento a plataforma  $i \in C$ .

$M$  : Número máximo de plataformas por rota.

$CC$  : Custo do combustível;

$CP$  : Custo da penalidade.

### Variáveis de Decisão:

$x_{ijk} \in \{0,1\}$ . Se  $x_{ijk} = 1$ , o arco  $(i,j) \in A$  está sendo usado pelo navio  $k \in K$ , caso contrário,  $x_{ijk} = 0$ .

$u_{ik} \in \{0,1\}$ . Se  $u_{ik} = 1$ , a plataforma  $i \in C$  é atendida pelo navio  $k \in K$ , caso contrário,  $u_{ik} = 0$ .

$y_{ijk}$  : Fluxo em cada arco  $(i,j) \in A$  percorrido pelo navio  $k \in K$ .

$tt_{ik}$  : Tempo até a plataforma  $i \in C$  com o navio  $k \in K$ .

$td_{ijk}$  : Tempo de deslocamento do vértice  $i \in V$  para  $j \in V$  usando o navio  $k \in K$ .

$tp_{ijk}$  : Tempo parado da plataforma  $i \in C$  para  $j \in C$  usando o navio  $k \in K$ .

$custo_{ijk}$  : Custo de deslocamento do vértice  $i \in V$  para  $j \in V$  usando o navio  $k \in K$ .

$pen_i$  : Penalidade por chegar na plataforma  $i \in C$  após o instante  $l_i$ .

$custoa_i$  : Custo de atendimento na plataforma  $i \in C$ .

Utilizando as notações acima, formula-se o seguinte modelo de programação linear inteira mista (Meza *et al.*, 2015):

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} custo_{ijk} + \sum_{i \in C} pen_i + \sum_{i \in C} custoa_i \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{ijk} - \sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{jik} = u_{jk} \quad \forall k \in K, j \in C \quad (3.2)$$

$$y_{ijk} \leq Mx_{ijk} \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.3)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} x_{ijk} = u_{jk} \quad \forall k \in K, j \in C \quad (3.4)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} x_{jik} = u_{jk} \quad \forall k \in K, j \in C \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in C} (dem_i u_{ik}) \leq cap_{tipok} \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in K} u_{ik} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3.7)$$

$$\sum_{\substack{i \in C \\ i \neq 1}} x_{1ik} = \sum_{\substack{i \in C \\ i \neq 1}} x_{i1k} \quad \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$td_{ijk} = \left( \frac{d_{ij}}{vel_{tipok}} \right) x_{ijk} \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.9)$$

$$tt_{jk} \geq tt_{ik} + ta_i + td_{ijk}(aut)(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, j \in C, \forall i \in V, i \neq j \quad (3.10)$$

$$tp_{ijk} \geq tt_{jk} - tt_{ik} - td_{ijk} - ta_i - (aut)(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.11)$$

$$custo_{ijk} \geq (CC\ conn_{tipok})td_{ijk} + CC\ comp_{tipok}tp_{ijk} \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.12)$$

$$custoa_i \geq \sum_{k \in K} CC(ta_i u_{ik})\ comp_{tipok} \quad \forall i \in C \quad (3.13)$$

$$tt_{ik} \geq e_i \quad \forall k \in K, i \in C \quad (3.14)$$

$$tt_{ik} \leq q_i \quad \forall k \in K, i \in C \quad (3.15)$$

$$pen_i \geq CP(tt_{ik} - l_i) \quad \forall k \in K, i \in C \quad (3.16)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.17)$$

$$u_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, i \in V \quad (3.18)$$

$$y_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.19)$$

$$tp_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.20)$$

$$td_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.21)$$

$$custo_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, i, j \in V, i \neq j \quad (3.22)$$

$$tt_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K, i \in V \quad (3.23)$$

$$pen_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.24)$$

$$custoa_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.25)$$

A Função Objetivo (3.1) busca minimizar os custos operacionais relacionados ao escoamento da produção (transporte e atendimento) e as penalidades (multas) a serem pagas caso o atendimento às plataformas ocorra fora do prazo estabelecido. As Restrições (3.2) garantem que a rota é conexa, ou seja, começa e termina no porto. As Restrições (3.3) asseguram que o fluxo na aresta  $(i, j)$  só poderá ocorrer se ela estiver sendo usada por algum navio. As Restrições (3.4) garantem que deve haver exatamente uma aresta chegando ao nó  $j \in C$  vindo do navio  $k \in K$ , caso  $j \in C$  seja atendida por  $k \in K$ . As Restrições (3.5) garantem que deve haver exatamente uma aresta saindo do nó  $j \in C$ . As

Restrições (3.6) asseguram que a demanda coletada pelo navio  $k \in K$  deve ser compatível com sua capacidade. As Restrições (3.7) indicam que uma plataforma  $i \in C$  deve ser atendida por um único navio  $k \in K$ . As Restrições (3.8) asseguram que o navio deve retornar para o nó de partida. As Restrições (3.9) calculam o tempo de deslocamento entre dois vértices. As Restrições (3.10) garantem que o tempo até a plataforma  $j \in C$  não deve ser menor que o tempo até sua antecessora  $i \in C$ , adicionando os tempos de deslocamento e o tempo de atendimento da plataforma  $i$ . A Restrição (R11) calcula o tempo parado entre os nós  $i$  e  $j$ , caso o navio precise aguardar para o atendimento da plataforma  $i$ . As Restrições (3.12) calcula o custo no arco ( $i, j \in V$ ). As Restrições (3.13) calculam o custo de atendimento de cada plataforma. As Restrições (3.14) asseguram que o navio não chega antes do tempo preestabelecido, respeitando a janela de tempo. As Restrições (3.15) asseguram que o navio deve atender a janela máxima de tempo. As Restrições (3.16) verificam se o navio chegou em uma determinada plataforma depois do prazo sem penalidade. Por último, as Restrições (3.17) - (3.22) estão relacionadas ao domínio das variáveis de decisão.

O modelo matemático de Meza *et al.* (2015) está limitado a um único terminal, entretanto aplicações reais podem permitir a utilização de mais de um terminal para atender as plataformas. Desta forma, a próxima seção apresenta um modelo matemático multi terminais.

### **3.2. Novo Modelo Matemático**

O problema do escoamento de petróleo por meio de navios aliviadores apresentado pode ser considerado como um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD) e pode ser definido como: dado um conjunto de navios, um conjunto de terminais (depósitos) e um conjunto de plataformas a serem atendidas com janelas de tempo definidas, o objetivo é encontrar rotas de atendimento para os navios aliviadores tal que o custo total da operação de coleta seja minimizado.

Sendo assim, o novo modelo matemático proposto foi baseado nos trabalhos de Desaulniers *et al.* (1998) e Kallehauge *et al.* (2005) que estão voltados ao PRVMD. Modificações foram então realizadas para que as características do problema aqui

abordado, fossem então consideradas. Ressalta-se no entanto que, este modelo, ao considerar apenas um terminal, consiste no problema abordado por Meza *et al.* (2015).

Sendo assim, as próximas seções apresentam os elementos do novo modelo matemático multi terminais.

### 3.2.1. Estrutura da Rede

Seja  $K$  um conjunto de navios aliviadores disponíveis. Uma rede  $G^k = (V^k, A^k)$  está associada a cada navio  $k \in K$ , sendo que  $V^k$  e  $A^k$  representam, respectivamente, o conjunto dos vértices e arcos na rede que podem ser visitados ou utilizados pelo navio  $k$ .

### 3.2.2. Vértices

O conjunto  $V^k$  apresenta três tipos de vértices: fonte, destino e operação. O terminal é representado por dois vértices: fonte  $o(k)$  e destino  $d(k)$ . Eles indicam o início e o fim do agendamento atribuído ao navio  $k \in K$ . Os nós definidos como operação, ou seja, as plataformas que podem ser atendidas pelo navio  $k$ , definem o conjunto  $P^k$ . Sendo assim, pode-se definir também  $F = \cup_{k \in K} P^k$  como sendo o conjunto de todas as plataformas que necessitam de atendimento.

Uma janela de tempo  $[l_i, u_i]$  está associada a cada vértice  $i \in V^k$ . Entretanto, esta janela de tempo é dividida em dois segmentos:  $[l_i, m_i]$  e  $[m_i + 1, u_i]$ . O primeiro segmento indica que se o atendimento for iniciado entre os instantes de tempo  $l_i$  e  $m_i$ , o navio não sofrerá penalidade, caso contrário, uma penalidade de atraso será considerada, mas, o navio não poderá iniciar a operação após o instante  $u_i$ . Esta característica está presente também no trabalho de Meza *et al.* (2015).

### 3.3.3. Arcos

Os arcos representam o deslocamento entre terminal e plataformas ou entre plataformas. Sendo assim, o conjunto  $A^k$  contém quatro tipos de arcos: vazio, início, final, e entre operações. O arco vazio representa a ligação direta entre  $o(k)$  e  $d(k)$ . Se o navio  $k \in K$  utilizar este arco, isto significa que ele não realizará atendimentos às plataformas. O arco de início  $(o(k), i)$  indica que o navio  $k$  deve deixar o seu vértice de início  $o(k)$  para

realizar a operação no vértice  $i \in V^k$ . Este arco representa a movimentação do navio  $k$  do terminal  $o(k)$  para atender a plataforma  $i \in V^k$ . O arco final é representado pelo arco  $(j, d(k))$  que representa o término da operação do navio  $k$  que deve deixar o vértice  $j \in V^k$  e seguir para o seu vértice de destino  $d(k)$ . Por fim o arco entre tarefas  $(i, j)$  é representado por um par de nós  $i, j \in V^k$ . Este arco indica os possíveis deslocamentos do navio  $k$  entre plataformas.

O tempo  $t_{ij}$  entre os vértices  $i, j \in V^k$  deve ser tal que  $l_i + t_{ij} \leq u_j$ . Este tempo é igual a duração da operação executada no vértice  $i$  mais o tempo de deslocamento (da viagem) entre os dois vértices. No caso de não ocorrer viagem do navio  $k \in K$ ,  $t_{o(k), d(k)} = 0$ . O arco de início tem o tempo  $t_{o(k), i}$  correspondente ao tempo de viagem do terminal até o primeiro vértice de operação. O tempo no arco final,  $t_{i, d(k)}$ , corresponde a viagem do navio  $k \in K$  proveniente da última operação realizada no vértice  $i \in P^k$  até o seu destino final  $d(k)$ .

Com isso, a seguir são apresentados os demais elementos necessários para a compreensão do modelo matemático.

- **Parâmetros:**

$cap_k$  : Capacidade do navio  $k \in K$ .

$dem_i$  : Demanda da plataforma  $i \in F$ .

$l_i$  : Instante inicial da janela de tempo da plataforma  $i \in F$ .

$m_i$  : Instante final da janela de tempo da plataforma  $i \in F$  sem penalidade.

$u_i$  : Instante final da janela de tempo da plataforma  $i \in F$  com penalidade.

$CC$  : Custo do combustível para todos os navios.

$CP^k$  : Custo de penalidade para o navio  $k \in K$ .

$C_{ijk}$  : Custo de deslocamento do vértice  $i \in V^k$  para  $j \in V^k$  usando o navio  $k \in K$ .

$CN_{ijk}$  : Custo de atendimento da plataforma  $i \in P^k$  usando o navio  $k \in K$ .

$pen_i$  : Penalidade por chegar na plataforma  $i \in F$  após o instante  $m_i$ .

$cn^k$  : Custo do navegando do navio  $k \in K$ .

$cp^k$  : Custo parado do navio  $k \in K$ .

$ta_i$  : Tempo de atendimento da plataforma  $i \in F$  .

aut: Autonomia dos navios.

- **Variáveis de Decisão:**

$x_{ijk} \in \{0,1\}$ . Se  $x_{ijk} = 1$ , a aresta  $(i,j)$  está sendo usada pelo navio  $k \in K$ , caso contrário,  $x_{ijk} = 0$ .

$t_{ik}$ : Tempo até a plataforma  $i \in F$  pelo navio  $k \in K$ .

$t_{jk}$ : Tempo que o navio  $k \in K$  demora para chegar na plataforma  $j \in F$ .

$\alpha_{ik}$ : Tempo de chegada após o  $m_i$  pelo navio  $k \in K$ .

- **Custos nos Arcos**

O custo  $C_{ij}^k$  está associado a cada arco  $(i,j) \in A^k$ ,  $k \in K$  e representa o custo de execução das operações em  $i \in V^k$ . O custo do arco é referente ao custo do combustível ( $CC$ ) multiplicado pelo consumo do navio  $k \in K$  ( $cn^k$ ) em um determinado tempo de deslocamento ( $td_{ij}^k$ ) entre os vértices  $i,j \in V^k$ , somado ao consumo parado ( $cp^k$ ) do navio  $k \in K$  multiplicado pelo  $CC$  e pelo seu tempo de espera  $tp_j^k$  para realizar a operação na plataforma  $j \in V^k$ . Portanto:

$$CC_{ij}^k = (CC cn^k) td_{ij}^k + (CC cp^k) tp_j^k \quad (3.26)$$

- **Custo nos Vértices**

O custo no vértice ( $CN_i$ ) está associado apenas ao vértice  $i \in F$ , ou seja, a plataforma, quando é atendida. Este custo está relacionado ao tempo de atendimento ( $ta_i$ ) multiplicado pelo  $CC$  e pelo  $cp_i^k$ , caso a operação seja realizada pelo navio  $k \in K$ . Portanto:

$$CN_i = CC ta_i cp_i^k \quad (3.27)$$

- **Custo de Penalidade**

A custo da penalidade ( $pen_i$ ) refere-se à janela de tempo e ocorre quando o navio  $k \in K$  chega após o instante  $m_i$  da plataforma  $i \in V^k$ . A função de  $pen_i$  é definida pelo custo de penalidade ( $CP^k$ ) multiplicado pelo  $\alpha_i^k$  que é o tempo de atraso do navio  $k \in K$  por ter chegado após o instante  $m_i$ , portanto:

$$pen_i = CP^k \alpha_i^k \quad (3.28)$$

Com isso, o modelo matemático multi terminais proposto consiste em um modelo de programação linear inteira mista e está apresentado a seguir.

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij}^k + \sum_{(i) \in F} CN_i + \sum_{i \in F} pen_i \quad (3.29)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A^k} x_{ij}^k \geq 1 \quad \forall i \in F \quad (3.30)$$

$$\sum_{j: (o(k),j) \in A^k} x_{o(k),j}^k = \sum_{j: (j,d(k)) \in A^k} x_{j,d(k)}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.31)$$

$$\sum_{i: (i,j) \in A^k} x_{ij}^k - \sum_{i: (j,i) \in A^k} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in K, j \in F \quad (3.32)$$

$$t_i^k + ta_i + td_{ij}^k - t_j^k - (\text{aut})(1 - x_{ij}^k) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in V^k \quad (3.33)$$

$$tp_{ij}^k + ta_i + td_{ij}^k + t_i^k - t_j^k - (\text{aut})(1 - x_{ij}^k) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A^k \quad (3.34)$$

$$\sum_{i \in V^k} dem_i \sum_{j \in V^k} x_{ij}^k \leq cap_k \quad \forall k \in K \quad (3.35)$$

$$t_i^k - \alpha_i^k - m_i x_{ij}^k \leq 0 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A^k \quad (3.36)$$

$$l_i \sum_{\substack{j \in V^k \\ j \neq i}} x_{ij}^k \leq t_i^k \leq u_i \sum_{\substack{j \in V^k \\ j \neq i}} x_{ij}^k \quad \forall k \in K, i \in P^k \quad (3.37)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, (i, j) \in V \quad (3.38)$$

$$\alpha_i^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall i \in P^k \quad (3.39)$$

A Função Objetivo (3.29) tem como objetivo minimizar os custos de roteamento dos navios aliviadores para o escoamento de petróleo nas plataformas FPSO. As Restrições (3.30) asseguram que cada plataforma é visitada ao menos uma vez por um navio  $k \in K$ . As Restrições (3.31) e (3.32) garantem a conservação do fluxo, ou seja, indicam que cada navio  $k \in K$  deve sair do ponto de origem para uma plataforma ou permanecer em um porto, ou ainda, ao visitar uma plataforma, ele deve deixá-la. As Restrições (3.33) e (3.34) asseguram a compatibilidade entre as variáveis de fluxo e de tempo. As Restrições (3.35) garantem que a capacidade do navio  $k \in K$  será respeitada. As Restrições (3.36) estão relacionadas ao tempo de penalidade caso o navio  $k \in K$  chegue após o instante da janela de tempo sem multa. As Restrições (3.37) indicam que as janelas de tempo devem ser respeitadas. Por fim, as Restrições (3.38) e (3.39) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão.

### 3.4. Considerações Finais

Este capítulo apresentou formalmente o problema de roteamento de navios aliviadores visando o escoamento de petróleo *offshore*. Inicialmente, o modelo matemático proposto por Meza *et al.* (2015) foi discutido. Devido às suas limitações, um novo modelo matemático de programação linear inteira mista foi proposto para o problema que permite com trabalhar com vários terminais. Considerando que *solvers* comerciais de otimização apresentam dificuldades para resolver este modelo quando instâncias reais são consideradas, pois o mesmo foi baseado no problema de roteamento de veículos, o próximo capítulo um ALNS que é capaz de obter boas soluções em um tempo computacional reduzido.

#### **4. ADAPTIVE LARGE NEIGHBORHOOD SEARCH PARA O PROBLEMA DE NAVIOS ALIVIADORES**

Os PRV's são comumente do tipo NP-*Hard*, ou seja, de difícil trato computacional por possuírem crescimento exponencial do tempo de solução em resposta ao aumento do número de variáveis dos problemas. Dessa forma, o problema de roteamento de navios aliviadores é muito semelhante aos PRV's encontrados na literatura e por este motivo, também é considerado como NP-*Hard*. A utilização de métodos exatos na solução do problema de roteamento de navios aliviadores se torna, muitas vezes, inviável mesmo para instâncias de pequeno porte. Por outro lado, problemas de grande porte torna relevante a investigação de métodos que utilizam heurísticas e meta-heurísticas para solução dos modelos matemáticos.

A meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) proposta neste capítulo, para o problema de roteamento de navios aliviadores, é baseada na meta-heurística *Large Neighborhood Search* (LNS), que foi apresentada inicialmente por Shaw (1997) para resolver o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (PRVJT). Ropke e Pisinger (2006), a partir do trabalho de Shaw (1997), decidiram por adicionar uma camada adaptativa ao LNS, gerando assim o ALNS.

Em seu trabalho, Ropke e Pisinger (2006) utilizaram o ALNS para resolver o problema capacitado de roteamento de veículos com *backhauls* em que rotas são definidas para os veículos de entrega que e no retorno ao depósito, passam a realizar coleta de mercadorias. Os autores testaram o algoritmo em 338 instâncias diferentes do problema, e o ALNS conseguiu achar soluções melhores das até então conhecidas em 227 delas.

Já em outro trabalho, Ropke e Pisinger (2006) testaram o ALNS no problema de roteamento de veículos com coleta e entrega e janelas de tempo. Os autores testaram a meta-heurística em mais de 350 instâncias com até 500 clientes e o algoritmo foi capaz de encontrar melhores soluções em mais de 50% das delas.

Já Pisinger e Ropke (2007), aplicaram o ALNS em outros problemas de roteamento de veículos: no problema de roteamento de veículos com janelas de tempo, no problema de

roteamento de veículos capacitados, no problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos, no problema de roteamento de veículos dependentes do local e no problema aberto de roteamento de veículos. Os autores transformaram todos estes problemas em um rico PRV e usaram o ALNS. De 486 instâncias testadas, o ALNS foi capaz de encontrar novas melhores soluções em 183 delas.

Portanto, devido à capacidade do ALNS de resolver problemas considerados difíceis na literatura de Otimização, diversos outros trabalhos foram publicados com a aplicação dessa meta-heurística. Entre estes trabalhos, pode-se destacar Laporte *et al.* (2010) que aplicam a meta-heurística ALNS no problema de arco capacitado com demandas estocásticas no contexto de coleta de lixo. Neste trabalho verifica-se que a meta-heurística ALNS trouxe resultados satisfatórios.

Outro trabalho a ser ressaltado é o de Ribeiro *et al.* (2012) que aplica o ALNS e compara seus resultados com os obtidos por outras duas meta-heurísticas (*Iterated Local Search* e *Clustering Search*) em um problema de roteamento de sondas para a manutenção de poços de petróleo *onshore*. Neste caso, para evitar uma drástica diminuição de produção ou até mesmo a parada de produção do petróleo, tais sondas fazem atendimento em cada poço para sua manutenção em um determinado tempo. Todas as abordagens, em particular o ALNS, deram boas soluções para instâncias derivadas de um cenário real.

E, por fim, pode-se destacar também o trabalho de Ribeiro e Laporte (2012) que tem a proposta de descrever um ALNS e aplicá-lo no problema de roteamento de veículos cumulativos capacitados, neste caso, o objetivo é minimizar a soma dos tempos de chegada dos veículos nos clientes. Neste trabalho, observa-se que o ALNS também obteve sucesso ao encontrar soluções de boa qualidade.

Os bons resultados do ALNS motivaram então sua aplicação no problema de roteamento de navios aliviadores. Sendo assim, seus mecanismos e características são descritos a seguir.

#### 4.1. Mecanismos e Funcionamento Geral do ALNS para o Problema de Roteamento de Navios Aliviadores

Como citado, o ALNS é uma extensão da meta-heurística LNS. O LNS permite utilizar múltiplos métodos (heurísticas) para destruir e reparar uma solução. O ALNS difere do LNS por considerar uma camada adaptativa que permite pontuar e, assim, dar uma maior preferência a um dado par de heurísticas de destruição e reparação mais adaptadas a instância sendo resolvida. O método inicia com uma solução que é modificada ao longo das iterações pelas heurísticas de destruição e reparação.

A cada iteração do ALNS, o método destrói parte de uma de solução atual  $s$  e a repara de um modo diferente, gerando uma nova solução  $s'$ . Essa nova solução é aceita de acordo com um critério de aceitação definido pelo paradigma de busca aplicado em um nível superior, como os critérios de aceitação do *Simulated Annealing* (SA) no qual se  $s'$  é melhor que  $s$ , a busca continua a partir de  $s'$ , caso contrário, a busca continua a partir de  $s$  com uma dada probabilidade.

As heurísticas de destruição e reparação são selecionadas de acordo com um mecanismo probabilístico adaptativo. A cada iteração, a probabilidade de selecionar um dado par de heurísticas de destruição e reparação, depende do quão bem elas se comportaram no passado. No ALNS a busca é dividida em segmentos, ou seja, conjuntos sequencias de iterações, e, a cada término de segmento, avalia-se o comportamento das heurísticas. Inicialmente, todas as heurísticas possuem pesos iguais (mesma probabilidade de serem selecionadas) que são modificados a cada término de segmento conforme os seus desempenhos. Se em uma determinada iteração um par de heurísticas de destruição e reparação levaram a uma nova solução, melhor que as anteriormente encontradas, essas heurísticas receberam pontuações elevadas que modificarão seus pesos no próximo segmento. Para efeito de algoritmo, considera que um segmento é composto de  $\varphi$  iterações do ALNS.

Além dessas características, o ALNS ainda apresenta os seguintes componentes: grande vizinhança, função objetivo penalizada, critérios de aceitação de soluções piores durante

o processo de busca, e ruído no cálculo da função objetivo para evitar que as heurísticas de remoção e inserção se tornem eficientes. Esses componentes são descritos a seguir:

- **Grande Vizinhaça (*Large Neighborhood*)** - Dada uma solução  $s$ , a cada iteração, elementos são removidos da solução e então reinseridos. No caso do problema de roteamento de navios aliviadores, a cada iteração remove-se um dado conjunto de plataformas com uma heurística de destruição que são então reinseridas por uma heurística de reparação;
- **Função Objetivo Penalizada** - Permite explorar o espaço de busca com rotas que violam restrições como, por exemplo, capacidade de carga. Considere uma solução  $s$ , sendo assim  $f(s)$  consiste então na função objetivo penalizada que representa o custo das rotas criadas acrescido das violações ponderadas por pesos. No caso do problema de roteamento de navios aliviadores, optou-se por trabalhar com um navio “fantasma” de capacidade infinita, mas de custo elevado. Caso uma heurística de reparação não consiga inserir uma plataforma na rota de um dos navios aliviadores, esta plataforma é adicionada na rota do navio “fantasma”. A rota deste navio “fantasma” apresenta custo elevado para que não considerado na solução.
- **Critério de Aceitação (Temperatura)** - Uma solução  $s$ , ao ser modificada por um par de heurísticas de destruição e reparação, produz a solução  $s'$ . Com isso,  $s'$  será aceita se  $f(s') < f(s)$  ou com probabilidade de  $e^{\frac{f(s)-f(s')}{T}}$ , sendo  $T$  denominado temperatura. Esta temperatura inicia com um valor  $T_0 > 0$  e decresce a cada iteração segundo uma taxa de resfriamento ( $0 < \alpha_t < 1$ ), terminando com valor  $T_f \cong 0$ ;
- **Mecanismo de Busca Adaptativa** - Este mecanismo que escolhe o par de heurísticas de destruição e reparação, é orientado por uma roleta ponderada que considera os pesos atribuídos as heurísticas conforme o seu desempenho nas iterações anteriores. Sendo assim, seja  $w_i$  o peso de seleção da heurística  $i$  e  $h$  o número total de heurísticas. A probabilidade da heurística  $j$  ser selecionada é dada

por  $\frac{w_j}{\sum_{i=0}^h w_i}$ . Tal processo é realizado separadamente para cada heurística de inserção e remoção.

Ropke e Pisinger (2006) ainda propuseram a utilização de ruído no cálculo da função objetivo para evitar que as heurísticas de remoção e inserção se tornem ineficiente. Entretanto, experimentos computacionais para o problema de roteamento de navios aliviadores não mostraram resultados significativos e, por isso, essa característica foi desconsiderada neste trabalho. Ribeiro e Laporte (2012) também não utilizaram ruído, pois os resultados computacionais também não foram significativos.

Sendo assim, o ALNS implementado neste trabalho para o problema de roteamento de navios aliviadores foi baseado em Ribeiro e Laporte (2012) e encontra-se descrito no Algoritmo 1.

#### **Algoritmo 1 – ALNS**

// $X^*$  Representa a melhor solução encontrada para o problema

Construir uma solução inicial  $X$  para o problema.

$X^* \leftarrow X$

Repita

$N^- \leftarrow$  Selecionar Heurística de Destruição  $H^-$

$X' \leftarrow N^-(X)$

$N^+ \leftarrow$  Selecionar Heurística de Reparação  $H^+$

Se Critério de Aceitação ( $X, X'$ )  $X \leftarrow X'$

Se  $f(X) < f(X^*)$   $X^* \leftarrow X$

Atualizar os pesos de  $N^-$  e  $N^+$

Se Segmento Finalizado, Então Atualizar os pesos das heurísticas.

Até que o critério de parada seja atendido.

Retorna  $X^*$

## 4.2. Detalhes do ALNS para o Problema de Navios Aliviadores

Nesta seção é descrito o ALNS especificando os detalhes da implementação. Vale destacar que a função objetivo é utilizada e a do modelo multi terminais (3.29), apresentado neste trabalho.

### 4.2.1. Solução Inicial

A solução inicial do problema de roteamento de navios aliviadores é dada a partir de uma solução vazia, sendo cada plataforma adicionada em uma posição da rota em que este incrementa menos a função objetivo. Cada plataforma é selecionada sequencialmente.

### 4.2.2. Heurísticas de Destruição (H-) e de Reparação (H+)

Esta seção descreve os métodos de desconstrução da solução que removem um número  $\gamma$  de plataformas da solução atual e as heurísticas de reparação, que possuem um comportamento mais determinístico. Sendo assim, as heurísticas de destruição e reparação utilizadas são:

- **Heurística de Remoção Aleatória:** Esta simples heurística remove  $\gamma$  plataformas selecionadas aleatoriamente da solução atual  $s$ . Ela tende a gerar um pior conjunto de plataformas removidas, mas ajuda a diversificar a busca;
- **Heurística de Remoção do Pior:** Esta heurística remove plataformas de alto custo na solução atual  $s$ , na possibilidade de inserções melhores posteriormente. Considera-se  $Custo^-(i, s) = f(s) - f_{-i}(s)$  como o custo associado à plataforma  $i$  para solução corrente  $s$ , onde  $v_{-i}(s)$  representa o custo da solução sem  $i$  em  $s$ . A heurística ordena as plataformas de acordo com  $Custo^-(i, s)$  de maneira crescente e escolhe uma a ser removida da mesma maneira que a heurística de Shaw (1997) e repete o processo de acordo com o número  $\gamma$  de plataformas a serem removidas. A heurística de Shaw (1997) procura remover pontos (plataformas) que apresentam custos similares na solução atual  $s$ . O Algoritmo 2 apresenta da heurística de remoção do pior;

## Algoritmo 2 - Heurística de Remoção do Pior

Entrada: Solução  $s$ ,  $\gamma$  e  $\delta \geq 1$

$D \leftarrow$  Lista de Removidos

Enquanto  $|D| < \gamma$  Faça

$L \leftarrow$  Plataformas de  $s$

Ordene  $L$  tal que  $i < j \Rightarrow \text{Custo} - (L_i, s) < \text{Custo} - (L_j, s)$

Escolha um número aleatório  $y$  de  $[0, 1]$

$i \leftarrow y^\delta |L|$

Remove  $L_i$  de  $s$  e faça  $D \leftarrow D + \{L_i\}$

Retorne  $s$  e  $D$

- **Heurística de Remoção do Pior Custo por Volume:** Muito parecida com a heurística de remoção do pior, entretanto, os custos de remoção ( $\text{Custo}^=(i, s)$ ) das plataformas são baseados nos custos das rotas e nos volumes coletados. Sendo assim, o custo  $\text{custo}^=(i, s)$  de uma plataforma  $i$  de uma rota qualquer é definido como o custo da rota que contenha esta plataforma dividido pelo volume total coletado. Esta heurística busca com este procedimento, considerar uma medida de desempenho no processo de remoção;
- **Algoritmo de Inserção:** Este algoritmo não é utilizado diretamente pelo ALNS, mas pelas duas heurísticas de construção descritas a seguir. Dado uma plataforma  $i$  e uma solução  $s$ , ele encontra o ponto de inserção que incrementa ao mínimo o valor da função objetivo, se possível inserir tal plataforma na solução atual;
- **Heurística de Construção Básica:** Dado uma solução  $s$ , esta heurística aplica o algoritmo de Inserção Guloso em cada plataforma na ordem inversa à que foram retiradas pela última heurística de remoção.
- **Heurística de Construção Gulosa:** Dado uma solução  $s$ , busca-se a plataforma  $i$  que possui a melhor contribuição para o custo total da solução, caso inserido

pelo algoritmo de Inserção. A plataforma  $i$  é inserida e o processo é repetido até que não haja mais possíveis inserções.

### 4.3. Camada Adaptativa

A camada adaptativa trabalha de forma que a cada iteração do ALNS, exista uma pontuação para o par de heurísticas selecionadas. Existem três tipos de pontuação,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e  $\tau_3$  que são utilizadas da seguinte forma: se o par de heurísticas apresentar sucesso, encontrando a nova melhor solução, este par receberá  $\tau_1$ , caso seja encontrado uma solução melhor que a atual, receberá  $\tau_2$  e por fim se encontrar uma solução pior que a atual mas ainda seja aceita pelo critério de aceitação do *Simulating Annealing*, recebe a pontuação  $\tau_3$ . Os valores atribuídos para  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  e  $\tau_3$  foram, respectivamente, 3000, 2000 e 1000.

Conforme apresentado no início deste capítulo, quando o segmento termina, os pesos de cada heurística são atualizados e a pontuação é reiniciada como zero para o próximo segmento. Seja  $\pi_i$  e  $\sigma_i$ , respectivamente, a pontuação e o número de vezes que a heurística  $i$  foi utilizado em um determinado segmento, então o próximo segmento com peso  $w_i$  é atualizado de acordo com a Equação (4.1). Sendo que  $0 < \alpha_A < 1$  é um parâmetro chamado de fator de reação, indicando a velocidade com que os pesos adaptativos mudam a cada segmento.

$$w_i = (1 - \alpha_A)w_i + \alpha_A \frac{\pi_i}{\sigma_i} \quad (4.1)$$

O parâmetro  $\alpha_A$  é um dos componentes determinantes para o funcionamento da camada adaptativa, segundo Ropke e Pisinger (2006). O parâmetro  $\alpha_A$  foi escolhido de maneira que ao passar 1/3 do total de iterações, os pesos iniciais possuíssem uma contribuição muito baixa. Observando a Equação (4.1), ao longo das iterações, o peso inicial de  $w_0$  terá valor  $w_0(1 - \alpha_A)^R$ , sendo  $R$  o Número da Iteração Corrente/ $\psi$ . Fazendo o desenvolvimento matemático, chega-se a Equação (4.2), sendo  $\psi$  o número de iterações do segmento,  $K$  o número máximo de iterações e  $w_f$  o valor dos pesos quando o número de iterações for igual a  $K/3$ . Basta qualquer valor aceitável para  $w_f$  sendo que  $w_f \ll w_0$ ,

para a completa adaptação dos pesos em cerca de 1/3 das iterações. O valores utilizados nos experimentos computacionais foram de  $w_0 = 250$  e  $w_f = 0,01$ .

$$\alpha_A = 1 - \left(\frac{w_f}{w_0}\right)^{\frac{3\psi}{k}} \quad (4.2)$$

#### 4.4. Temperatura

A temperatura tem influência direta no critério de aceitação do *Simulated Annealing*, com sua função de limitar a aceitação de soluções inferiores à solução corrente. Começando com a temperatura inicial  $T_0$  esta é calculada, quando a variação de  $f(s') - f(s)$  é igual a temperatura da iteração atual, a probabilidade de aceitação é calculada a partir da Equação (4.3).

$$e^{\frac{f(s)-f(s')}{T}} \quad (4.3)$$

E a cada iteração do ALNS, a temperatura é gradativamente reduzida conforme a Equação (4.4) para que a probabilidade de aceitação de soluções piores seja reduzida, forçando o método a intensificar a busca nas proximidades da melhor solução encontrada. O parâmetro  $\alpha_t$  é conhecido como taxa de resfriamento.

$$T \leftarrow \alpha_T T \quad (4.4)$$

Dessa forma, a probabilidade de aceitação sempre dependerá do quociente da variação entre  $f(s') - f(s)$  pela temperatura  $T$ , então é esperado que  $T$  tenha a grandeza proporcional aos valores de  $f(s)$ . Diante disto, a escolha da temperatura inicial  $T_0$  e a temperatura final  $T_f$  são importantes para o critério de aceitação ao longo do processo de busca. Sendo assim, valores de  $T_0$ ,  $\alpha_T$  e  $k$  (número máximo de iterações) são arbitrários para qualquer grupo de instancias, mas neste caso o número máximo de iterações e a temperatura de congelamento ( $T_f$ ) são critérios de parada, portanto o valor da taxa de resfriamento foi escolhido considerando o valor das temperatura ao longo das iterações, já que cada iteração a temperatura é modificada. Sabendo que o algoritmo possui um valor

$k$  de iterações, pode usar as relações iniciais (*Iteração* = 0  $\rightarrow T = T_0$ ), diante disso a temperatura  $\alpha_t$  pode ser obtida por meio da Equação (4.5).

$$\alpha_t = \sqrt[k-1]{\frac{T_f}{T_0}} \quad (4.5)$$

Desta maneira, o  $\alpha_T$  deixa de ser um parâmetro e passa a depender diretamente de  $T_0$ ,  $T_f$  e  $k$ . Finalmente a temperatura inicial foi escolhida como sendo 1/3 do valor da função objetivo da solução inicial e a temperatura final como 1/500 do valor da solução inicial.

#### **4.8. Considerações Finais**

Este capítulo apresentou o ALNS para o problema de roteamento de navios aliviadores. Inicialmente foram apresentados alguns trabalhos que utilizaram o ALNS em problemas de roteamento e obtiveram sucesso. Em seguida todos os mecanismos do ALNS implementado foram descritos. Sendo assim próximo capítulo apresenta os experimentos computacionais que avaliam o modelo matemático descrito no Capítulo 3 e o ALNS.

## 5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Este Capítulo apresenta os resultados computacionais envolvendo o modelo matemático proposto no Capítulo 3 e o ALNS, descrito no Capítulo 4.

### 5.1. Informações Gerais

Diversas instancias com posicionamento e demandas diferentes foram propostas para os testes computacionais. A Tabela 5.1 apresenta os dados consolidados dos navios aliviadores. Essas informações foram retiradas de Meza *et al.* (2015).

Tabela 5.1: Parâmetros dos Navios

Tipos de Navios	Panamax	Aframax	Suezmax
Capacidade (m <sup>3</sup> )	60.000	110.000	160.000
Velocidade (km/h)	10	11	12
CONSP (R\$/h)	441	496	551
CONSD (R\$/h)	4.412	5.614	7.599
Autonomia (h)	480	480	480

Na Tabela 5.1, os parâmetros CONSP e CONSD se referem ao consumo do navio. O primeiro é o consumo quando se realiza a operação *offloading* e o segundo está associado ao consumo do navio navegando. O parâmetro Autonomia se refere a quanto tempo o navio consegue ficar em alto mar sem necessidade de reabastecimento e os demais entre associados à capacidade e velocidade.

A Tabela 5.2 apresenta os dados das plataformas. Cada plataforma possui uma localização (latitude e longitude), demanda (m<sup>3</sup>), tempo de atendimento (h) e janelas de tempo com ou sem penalidade. Essas informações foram geradas de maneira aleatória por falta de dados reais.

Tabela 5.2: Dados das Plataformas

Localização		Demanda (m <sup>3</sup> )	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
Latitude	Longitude					
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274

Para efeito de comparação com o trabalho de Meza *et al.* (2015), foram criadas localizações para os navios alocados em um único terminal. A Tabela 5.3 apresenta dados que envolvem a localização (latitude e longitude), tipo e quantidade de navios. Dependendo do tipo, a Tabela 5.1 apresenta as características da embarcação.

Tabela 5.3: Dados dos Navios – Um Terminal

Número de Terminais	Localização		Tipo	Quantidade
	Latitude	Longitude		
1	100	0	Suezmax	8
	100	0	Aframax	3
	100	0	Panamax	2

Para realizar testes com o modelo multi terminais, foram criadas localizações (latitude e longitude) para os navios baseados em dois terminais. A Tabela 5.4 apresenta os dados dos navios, possuindo a mesma estrutura que a Tabela 5.3, porém com dois terminais.

Tabela 5.4: Dados dos Navios – 2 Terminais

Número de Terminais	Localização		Tipo	Quantidade
	Latitude	Longitude		
1	100	0	Suezmax	4
2	150	0	Suezmax	4
	150	0	Aframax	3
	150	0	Panamax	2

Assim, neste trabalho, uma instancia é caracterizada por combinar os dados das plataformas e navios. Por exemplo, as Tabelas 5.2 e 5.3 formam uma instancia e 5.2 com 5.4 formam outra.

Os testes computacionais consideram diferentes quantidades de plataformas, porém os dados dos navios, Tabelas 5.3 e 5.4, foram mantidos. Sendo assim, o Apêndice I apresenta, em tabelas, dados sobre as plataformas consideradas. Ao todo, foram criadas 10 tabelas com informações sobre plataformas, sendo que o menor conjunto tem 10 plataformas e o maior 28.

Os testes foram realizados utilizando um computador com CPU Intel I5 2,4 GHz com memória RAM de 6GB DDR3. Os modelos foram resolvidos com no software CPLEX 12.5 (IBM, 2012) e o ALNS foi codificado em linguagem C e compilado com o GCC. Utilizou-se 3600 segundos com tempo máximo de execução do CPLEX 12.5 (IBM, 2012).

## 5.2. Comparação dos Modelos

A Tabela 5.5 apresenta o número de variáveis e de restrições geradas por cada modelo para cada instancia em um único terminal. Pode-se verificar que o modelo matemático de multi terminais apresenta um número menor de variáveis e restrições.

Tabela 5.5: Características do Modelo

Instâncias	Modelo	Caratecrístas do Modelo	
		Número de Variáveis	Número de Restrições
1	Meza	7541	8061
	Mult	4980	6199
2	Meza	10591	11215
	Mult	6928	8679
3	Meza	14161	14889
	Mult	9196	11575
4	Meza	18251	19083
	Mult	11784	14887
5	Meza	22861	23797
	Mult	14692	18615
6	Meza	27991	29031
	Mult	17920	22759
7	Meza	33641	34785
	Mult	21468	27319
8	Meza	39811	41059
	Mult	25336	32295
9	Meza	46501	47853
	Mult	29524	37687
10	Meza	53711	55167
	Mult	34032	43495

A Tabela 5.6 apresenta os resultados da relaxação de programação linear (PL) dos dois modelos. Desta maneira, observa que o modelo de Meza *et al.* (2015) possui um limitante de programação linear ( $FO_{PL}$ ) melhor, porém um tempo computacional maior. Por exemplo, na instância 10, o modelo de Meza *et al.* (2015) apresenta um limitante da ordem de 708 mil em 14,88 segundos enquanto o modelo de multi terminais possui um limitante da ordem de 562 mil em apenas 0,16 segundos.

Tabela 5.6: Resultado da Relaxação de Programação Linear

Instâncias	Modelo	FO <sub>PL</sub>	Tempo (s)
1	Meza	412.132,93	0,50
	Mult	365.726,19	0,08
2	Meza	468.377,45	0,47
	Mult	421.084,87	0,13
3	Meza	451.404,78	1,38
	Mult	404.559,34	0,06
4	Meza	468.042,78	1,88
	Mult	392.057,53	0,08
5	Meza	496.482,67	3,44
	Mult	407.633,90	0,06
6	Meza	569.601,96	6,39
	Mult	471.946,58	0,14
7	Meza	622.055,95	11,73
	Mult	511.795,04	0,14
8	Meza	638.277,20	17,23
	Mult	516.403,47	0,17
9	Meza	668.330,43	11,91
	Mult	530.026,14	0,17
10	Meza	708.705,54	14,88
	Mult	562.378,56	0,16
Média	Meza	550.341,17	6,98
	Mult	458.361,16	0,12

A Tabela 5.7 apresenta os resultados do CPLEX 12.5 (IBM, 2012) após 3600 segundos de execução ou após parar por falta de memória. Observa-se que os *GAPs* de programação linear ( $GAP_{PL}$ ) são próximos nos dois modelos. Todavia, o CPLEX 12.5 (IBM, 2012), ao executar o método de *Branch and Bound*, explora um número maior de nós na árvore de busca bem como realiza mais iterações no modelo multi terminais.

Como pode ser verificado na Tabela 5.7, o CPLEX 12.5 (IBM, 2012) consegue melhores resultados com o modelo multi terminais, embora os *GAPs* residuais sejam maiores nas menores instâncias. Em média, o modelo com multi terminais apresentou uma redução média de 5,6% do custo total. Cabe ressaltar que a operação de roteamento envolve um custo elevado, consequentemente 5,6% de redução pode ser algo bastante relevante para o setor.

Ao analisar os *GAP*'s residuais, nota-se que o CPLEX 12.5 (IBM, 2012) não foi capaz de gerar bons resultados. No modelo de Meza *et al.* (2015), encontrou-se uma média 69,62% como *GAP* residual contra 75,79% do modelo multi terminais. Embora os experimentos tenham sido limitados a 3600 segundos, testes foram realizados com um tempo maior, porém o CPLEX 12.5 (IBM, 2012), quando não parava por falta de memória, não produzia melhores resultados significativos.

Tabela 5.7: Resultados do *Branch and Bound*

<b>Instância</b>	<b>Modelo</b>	<b><i>FO (Upper Bound)</i></b>	<b><i>GAP<sub>PL</sub>(%)</i></b>	<b><i>Lower Bound</i></b>	<b>T(s)</b>	<b><i>GAP Residual(%)</i></b>	<b>n° de Nós</b>	<b>n° de Iterações</b>
1	Meza	2.444.419,00	83,14	1.925.181,15	3.600,00	21,24	204106	28986965
	Mult	2.384.862,30	84,66	1.164.478,11	3.600,00	51,17	7713561	91239674
2	Meza	2.927.359,12	84,00	1.568.838,10	3.600,00	46,41	81759	17607403
	Mult	2.854.465,42	85,25	989.609,19	3.600,00	65,33	6950452	79963068
3	Meza	3.015.106,86	85,03	808.816,70	3.600,00	73,17	36819	15232422
	Mult	2.936.051,14	86,22	769.779,50	3.600,00	73,78	4323475	66604208
4	Meza	3.375.548,71	86,13	807.367,53	3.600,00	76,08	27156	8034681
	Mult	3.281.385,14	88,05	755.707,78	2.707,19	76,97	1109232	12001670
5	Meza	3.759.012,90	86,79	818.507,95	3.600,00	78,23	9542	8477745
	Mult	3.529.136,01	88,45	714.184,00	2.593,41	79,76	849610	11844327
6	Meza	4.011.690,73	85,80	862.507,79	3.600,00	78,50	6067	3863994
	Mult	3.784.920,48	87,53	754.518,60	3.600,00	80,07	707082	12596068
7	Meza	4.449.253,12	86,02	925.347,60	3.600,00	79,20	5328	6078761
	Mult	4.188.501,29	87,78	804.893,72	2.803,34	80,78	542391	9336646
8	Meza	4.940.283,63	87,08	958.254,28	3.600,00	80,60	3430	3521099
	Mult	4.498.012,00	88,52	829.801,35	3.184,63	81,55	498731	10483282
9	Meza	5.202.847,82	87,15	972.803,17	3.600,00	81,30	2780	4098525
	Mult	4.771.603,13	88,89	813.994,19	3.600,00	82,94	450702	12399133
10	Meza	5.620.103,14	87,39	1.041.554,13	3.600,00	81,47	2486	2778573
	Mult	5.398.082,09	89,58	781.210,67	3.600,00	85,53	400244	9194508
Média	Meza	3.974.562,50	85,85	1.068.917,84	3.600,00	69,62	37.947	9.868.017
	Mult	3.762.701,90	87,49	837.817,71	3.288,86	75,79	2.354.548	31.566.258

As Figuras 5.1 até 5.6 apresentam gráficos sobre o comportamento do *GAP* residual para, respectivamente, as instâncias 1, 5 e 10. Desta forma, observa-se que o modelo de Meza *et al.* (2015) apresenta dificuldades quanto a convergência. Os limitantes superiores e inferiores permaneceram estagnados durante um bom tempo, sem apresentar melhoras. Já o modelo multi terminais possui melhor convergência no que diz respeito ao limitante superior. As demais figuras de cada instâncias estão disponíveis no Apêndice II.

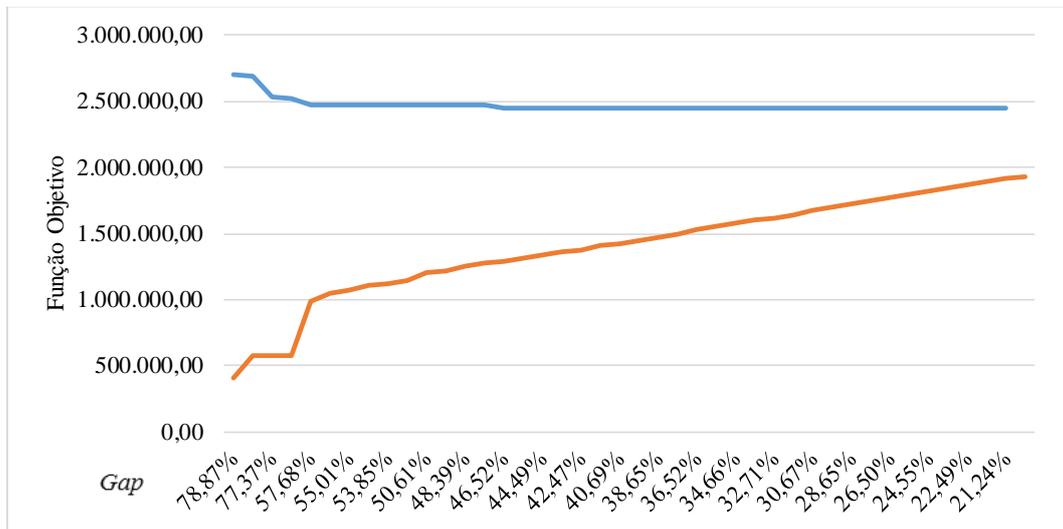


Figura 5.1: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 1.

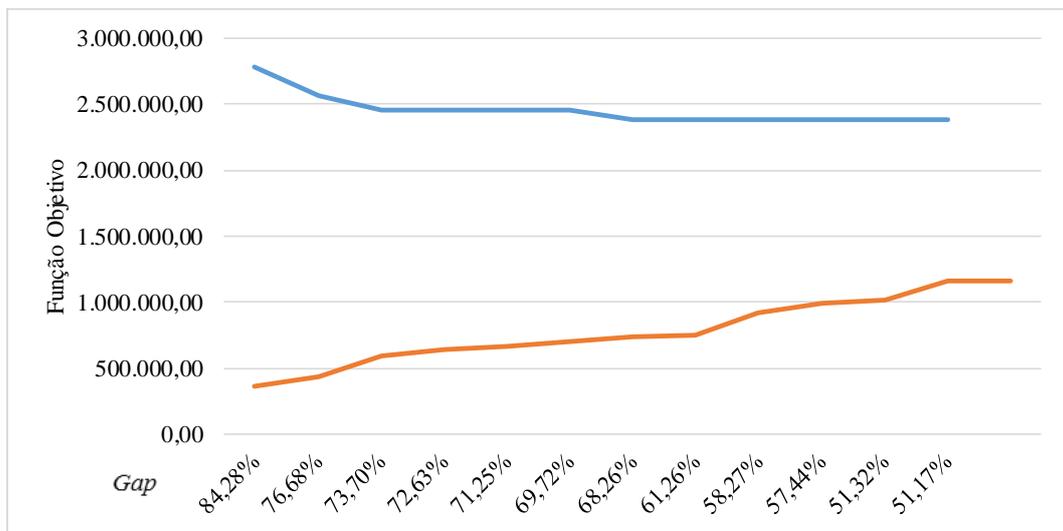


Figura 5.2: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 1.

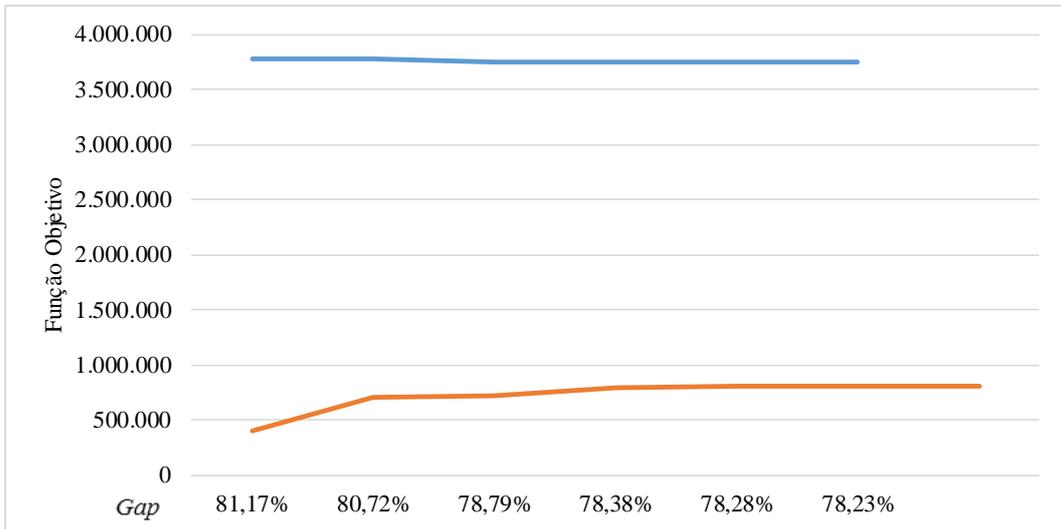


Figura 5.3: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 5.

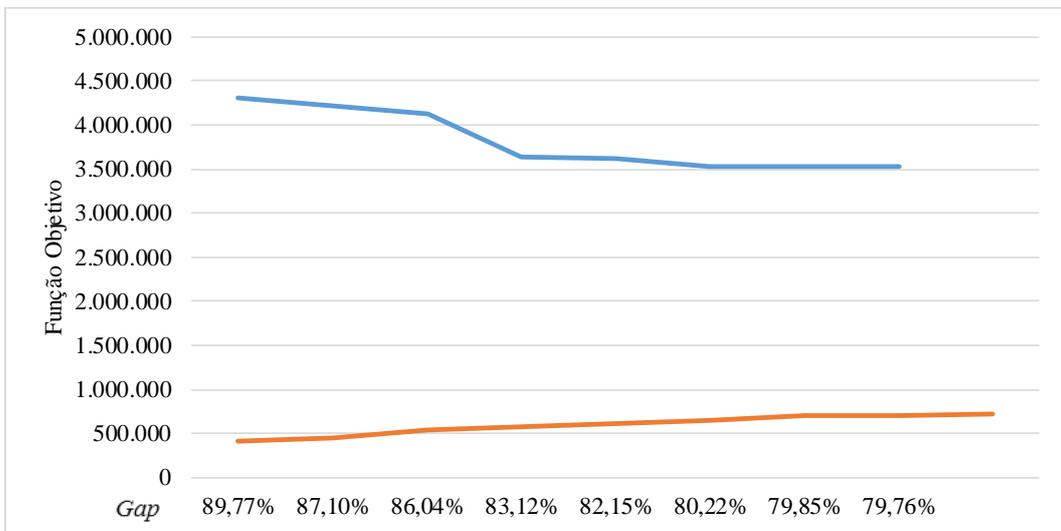


Figura 5.4: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 5.

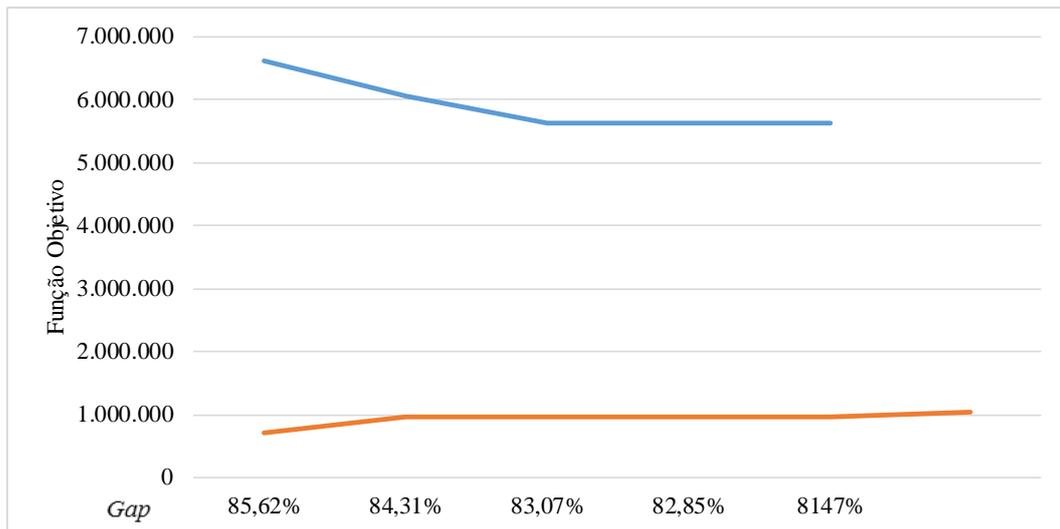


Figura 5.5: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 1.

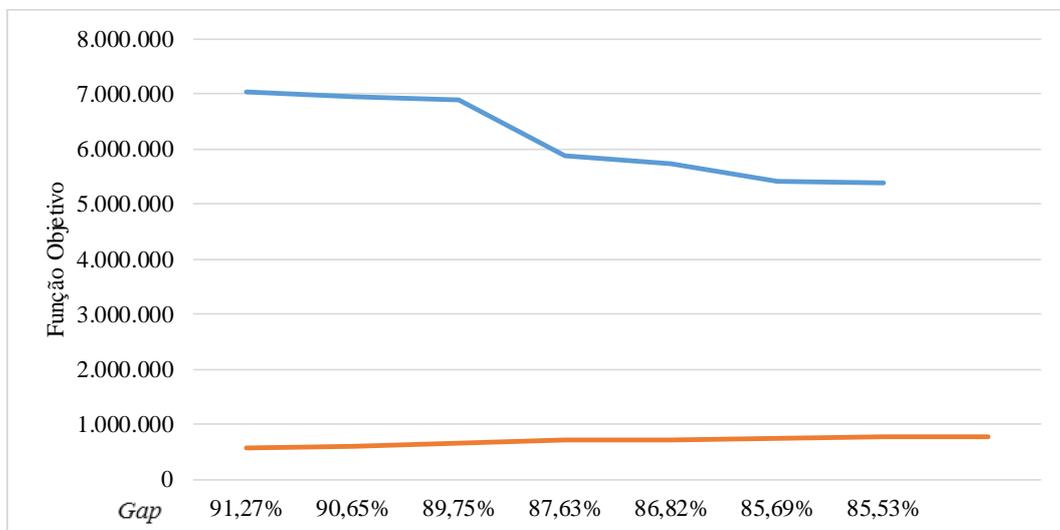


Figura 5.6: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 10.

### 5.3. Resultados do ALNS

O ALNS foi implementado para o caso multi terminais, o que não impede utiliza-lo em situações com um único terminal. Porém o ALNS precisa ser calibrado antes de ser empregado, com isso, a Seção 5.3.1 apresenta o processo de calibração utilizado.

#### 5.3.1. Calibração dos Parâmetros

Para executar o processo de calibração foram escolhidas aleatoriamente as instâncias 1,5 e 10 com um único terminal e o ALNS foi executado 15 vezes. Conforme Ropke e

Pisinger (2007), a calibração foi executada de forma que, durante o processo de ajuste de um dado parâmetro, os demais permaneciam fixados. Com isso, uma vez calibrado um parâmetro o processo continua com o próximo até que todos estejam ajustados. O processo de calibração foi aplicado ao número de requisições a serem removidas ( $\gamma$ ), número máximo de iterações ( $k$ ) e ao número de segmentos. Para iniciar o processo de calibração, foi estabelecido um valor para  $k$  de 1.000.000 com 200 segmentos. Os resultados obtidos estão descritos a seguir sendo que os demais parâmetros do ALNS foram obtidos com base na literatura disponível:

- **Número de elementos removidos e reinseridos por iteração** O parâmetro  $\gamma$  foi obtido com base nos seguintes percentuais: [1-5]%, [3-10]%, [5-10]%, [7-10]%, [5-15]%, [7-20]%, [7-25]%, [10-25]%, [10-30]%, [15-30]%. Por exemplo, para a faixa [1-5]%, a cada iteração do ALNS, o número de requisições removidas é um número aleatório entre 1% e 5% do total.

Portanto para realização dos testes, cada instância foi executada 15 vezes em cada uma das variações dos percentuais. A Tabela 5.8 apresenta as médias das funções objetivo e tempo médio de execução. A linha destacada em azul refere-se ao percentual que obteve os melhores resultados. Desta forma o percentual [10-30]% foi usado nos testes computacionais;

- **Número de segmentos** O número de segmentos foi obtido com base nos seguintes valores: 25, 50, 100, 150 e 200. A Tabela 5.9 apresenta as médias das funções objetivo e o tempo médio das execuções. Novamente a linha destacada, apresenta o melhor desempenho computacional, sendo então escolhido o número 50 de segmentos. Vale ressaltar que o parâmetro  $\gamma$  foi estabelecido como [10-30]% conforme indicado anteriormente; e
- **Número máximo de iterações** O número de iterações foi obtido com base nos seguintes valores: 75.000, 100.000, 150.000, 200.000 e 250.000. A Tabela 5.10 apresenta as médias das funções objetivo e o tempo médio das execuções. O melhor resultado foi obtido com 200.000 iterações (veja linha destacada).

Tabela 5.8: Número de elementos removidos e reinseridos por iteração

$\gamma$ (%)	Instancia 1		Instancia 5		Instancia 10	
	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)
1-5	2.539.264,32	0,66	3.410.857,08	0,95	5.116.653,60	1,55
3-10	2.539.307,35	0,63	3.411.076,23	1,46	5.096.102,67	1,89
5-10	2.539.259,15	0,74	3.412.542,60	1,43	5.097.571,07	1,97
7-10	2.539.315,00	0,80	3.407.497,45	1,42	5.092.184,93	2,08
5-15	2.539.257,68	0,74	3.407.440,65	1,68	5.085.946,70	2,32
7-20	2.539.307,70	0,76	3.402.039,90	2,16	5.090.040,75	2,79
7-25	2.539.366,37	0,84	3.400.662,92	2,72	5.075.306,67	2,80
10-25	2.539.269,95	0,88	3.402.220,80	3,40	5.074.953,97	3,37
10-30	2.537.391,75	0,94	3.396.648,43	2,93	5.076.117,20	3,74
15-30	2.539.273,47	0,98	3.399.568,10	3,53	5.085.779,00	4,21

Tabela 5.9: Número de Segmentos

Segmento	Instancia 1		Instancia 5		Instancia 10	
	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)
25	2.539.277,52	1,17	3.399.291,42	2,23	5.085.547,33	4,45
50	2.539.294,73	1,08	3.401.470,25	2,1	5.075.310,63	4,17
100	2.539.351,47	1,16	3.401.254,42	2,09	5.076.845,10	4,85
150	2.539.282,92	0,93	3.403.510,43	2,25	5.082.678,97	4,73
200	2.539.674,45	1,18	3.403.600,77	2,47	5.086.582,37	5,16

Tabela 5.10: Número de Iterações

Iterações	Instancia 1		Instancia 5		Instancia 10	
	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)	Média Função Objetivo	Média Tempo (s)
75.000	2.536.734,95	0,79	3.398.918,58	1,91	5.082.083,50	3,79
100.000	2.539.315,72	1	3.394.240,32	2,57	5.073.727,10	4,35
150.000	2.539.334,10	1,65	3.396.547,33	3,99	5.070.278,33	7,57
200.000	2.536.873,90	2,31	3.389.549,47	4,45	5.065.032,17	9,9
250.000	2.537.898,45	3,11	3.389.989,63	6,06	5.061.959,13	12,36

### 5.3.2. Resultados e Comparações

O ALNS foi aplicado em cada uma das 20 instancias (10 com um terminal e 10 com dois terminais). O ALNS foi replicado 15 vezes em cada instância já que os tempos de execução foram baixo, obtendo as 15 soluções em menos de um minuto.

Os valores da função objetivo do modelo matemático multi terminais e do ALNS foram utilizados para efeito de comparação, bem como os tempos de execução. A Tabela 5.11 apresenta os resultados para as instâncias com um único terminal, o desvio apresentado está relacionado aos resultados do ALNS. Percebe-se que o ALNS apresenta bons resultados com 18 ou mais plataformas. Porém, o tempo computacional da meta-heurística é bem inferior ao do CPLEX. Além disso, nota-se que o ALNS apresentou baixo desvio em relação ao valor médio das 15 execuções.

A Figura 5.7 permite visualizar melhor o comportamento do ALNS. Nota-se que a partir de 16 plataformas, a meta-heurística apresenta melhores resultados com tendência a se distanciar cada vez mais dos resultados do CPLEX, quando o número de plataformas aumenta.

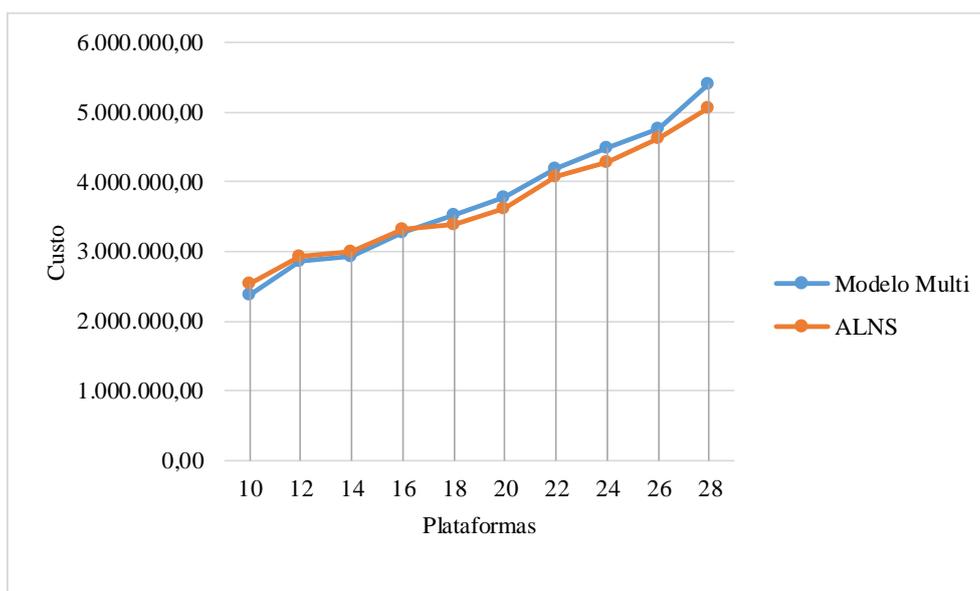


Figura 5.7: Comparação entre o modelo multi e o ALNS – Um Terminal

Tabela 5.11: Testes entre o Novo Modelo e o ALNS – 1 Terminal

Instâncias - Um terminal			Modelo Multi Terminais		ALNS			
Nº	Nº de Navios	Nº de Plat.	Função Objetivo (CPLEX)	Tempo de Processamento (s)	Melhor Resultado ALNS	Média dos Resultados ALNS	Tempo Médio ALNS	Desvio
1	13	10	2.384.862,30	3.600,00	2.539.325,30	2.539.346,22	0,9259	-0,0008%
2	13	12	2.854.465,42	3.600,00	2.927.339,50	2.939.498,12	0,7399	-0,48%
3	13	14	2.936.051,14	3.600,00	3.006.374,00	3.011.610,23	0,9493	-0,21%
4	13	16	3.281.385,14	2.707,19	3.309.706,50	3.316.073,63	1,2037	-0,25%
5	13	18	3.529.136,01	2.593,41	3.385.406,50	3.407.027,67	1,4258	-0,85%
6	13	20	3.784.920,48	3.600,00	3.610.365,00	3.674.563,82	1,8129	-2,53%
7	13	22	4.188.501,29	2.803,34	4.081.685,30	4.102.143,97	1,8934	-0,81%
8	13	24	4.498.012,00	3.184,63	4.270.106,00	4.337.466,13	2,2426	-2,65%
9	13	26	4.771.603,13	3.600,00	4.616.787,00	4.672.547,93	2,4376	-2,20%
10	13	28	5.398.082,09	3.600,00	5.054.454,00	5.084.336,00	2,9442	-1,18%
Média			3.762.701,90	3.288,86	3.680.154,91	3.708.461,37	1,66	-1,11%

A Tabela 5.12 apresenta os resultados para dois terminais e a Figura 5.8 destaca o comportamento dos valores da função objetivo. Novamente percebe-se o bom desempenho do ALNS, em especial quando são considerados mais que 14 plataformas.

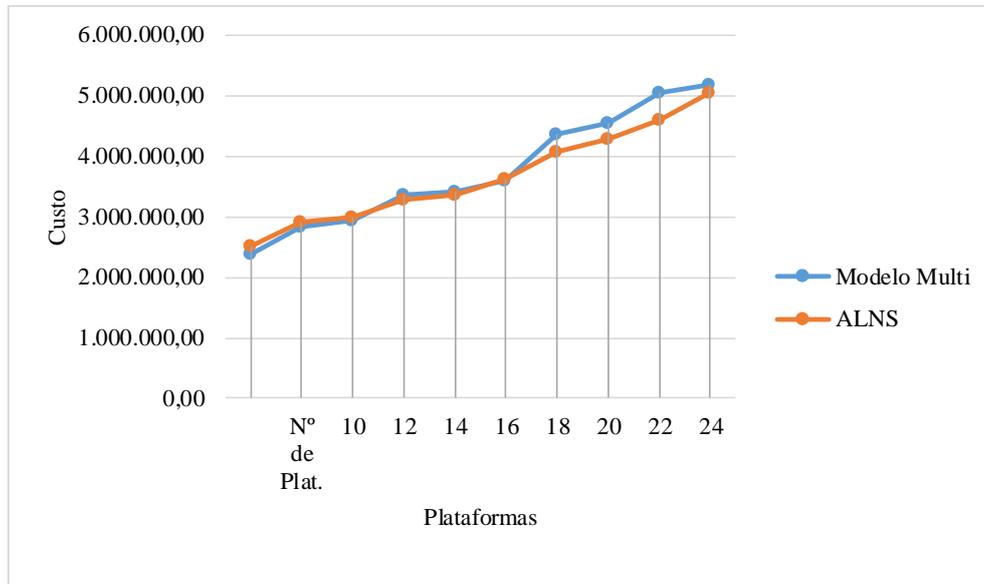


Figura 5.8: Comparação entre o modelo multi e o ALNS – Dois Terminais

Tabela 5.12: Testes entre o Novo Modelo e o ALNS – Dois Terminais

Instâncias - Dois terminais			Novo Multi Terminais		ALNS			
Nº	Nº de Navios	Nº de Plat.	Função Objetivo (CPLEX)	Tempo de Processamento (s)	Melhor Resultado ALNS	Média dos Resultados ALNS	Tempo Médio ALNS	Desvio
1	13	10	2.375.638,49	3600	2.526.965,75	2.527.153,40	0,60	-0,0074%
2	13	12	2.843.371,52	3600	2.919.284,00	2.939.310,28	0,74	-0,79%
3	13	14	2.926.836,06	3600	2.999.949,75	3.011.445,72	0,95	-0,45%
4	13	16	3.367.069,23	2883,95	3.290.423,00	3.300.086,93	1,16	-0,38%
5	13	18	3.414.282,66	3478,02	3.369.216,25	3.390.646,32	1,43	-0,84%
6	13	20	3.592.977,16	3600	3.633.705,75	3.686.087,15	1,73	-2,06%
7	13	22	4.367.319,29	3600	4.073.683,25	4.092.667,00	1,96	-0,75%
8	13	24	4.542.612,02	3600	4.282.859,50	4.320.730,27	2,25	-1,49%
9	13	26	5.057.970,58	3600	4.606.678,50	4.660.918,70	2,44	-2,14%
10	13	28	5.182.986,62	3600	5.052.962,50	5.069.755,57	2,89	-0,66%
Média			3.767.106,36	3.516,20	3.675.572,83	3.699.880,13	1,62	-0,96%

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um novo modelo matemático para o problema de roteamento de navios aliviadores. Este modelo foi obtido tomando como base o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e multi depósitos.

Para entender melhor o problema e criar o modelo matemático, analisou-se a cadeia de suprimentos do petróleo com ênfase no transporte de petróleo por meio de navios aliviadores. Buscou-se também compreender o funcionamento do escoamento com navios aliviadores.

Com os conceitos adquiridos e a partir de uma revisão da literatura, o problema foi modelado matematicamente para considerar que os navios aliviadores poderiam estar localizados em terminais diferentes. A literatura sobre o assunto abordou apenas um terminal. Desta forma, esta dissertação contribui cientificamente preenchendo uma lacuna de pesquisa. Cabe ressaltar que este problema se torna importante principalmente na produção *offshore* brasileira que possui campos de produção cada vez mais distantes da costa. Testes computacionais com instâncias geradas mostram que o modelo matemático proposto apresenta melhores resultados que o de Meza *et al.* (2015).

Devido às dificuldades computacionais para resolver o modelo matemático proposto, optou-se por implementar uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS). Testes computacionais mostraram o bom desempenho do ALNS, principalmente quando o número de plataformas a serem atendidas aumenta.

Como trabalhos futuros, nota-se que os tempos de deslocamento das embarcações podem variar conforme as condições de natureza. Essas variações podem afetar as rotas dos navios aliviadores, como por exemplo, o não atendimento dentro da janela de tempo das plataformas, o que poderia gerar prejuízos econômicos. Com isso, sugere-se estudar modelos de otimização que levem em consideração esta variabilidade do tempo de deslocamento. Além disso, o processo de coleta e entrega do petróleo por navios aliviadores pode ser influenciado por outras instalações como, por exemplo, a localização

das refinarias. Pode ser interessante coletar o petróleo e entregá-lo em um terminal próxima a uma refinaria que possua demanda específica, influenciando a tomada de decisão que envolve a criação das rotas.

Outro ponto interessante de estudo é investir em métodos que melhorem os limitantes inferiores, já que estes apresentam resultados bem ruins, melhorando então os *gaps* do modelo multi terminais.

Por outro lado, esta dissertação apresentou um ALNS para o problema que pode ser usado futuramente na própria indústria. Cabe também estudos específicos com outras técnicas de otimização como, por exemplo, Algoritmos Genéticos e Algoritmos de *Branch and Cut*. Estes estudos permitiriam indicar a melhor técnica para elaborar as rotas no que diz respeito a custos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASILIO, P. M. A.; VEIRA, B. S.; CAMARA, M. V. O.; RIBEIRO, G. M., 2015, “Uma heurística para o problema de roteamento de navios aliviadores no escoamento de petróleo.” *V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Ponta Grossa, Paraná, Brasil, Dez.

BRASIL, LEI 9.478/97, 6 de agosto de 1997, Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm)> Acesso em 15 de novembro de 2015.

CPLEX 12.5, T. M. versão 12.5. IBM ILOG, Sunnyvale, California, 2012.

DESAULNIER, G.; LAVIGNE, J.; SOUMIS, F., 1998, “Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs”, *European Journal of Operation Research*, n 111, p. 479-494.

FARAH, M. C., 2012, *Petróleo e Seus Derivados*, Petrobras, Rio de Janeiro.

FERREIRA FILHO, V. J. M., 2016, *Gestão de Operações e Logística na Produção de Petróleo*, Elsevier, Rio de Janeiro.

KALLEHAUGE, B.; LARSEN, J.; MADSEN, O. B. G.; SOLOMON, M.M.; “Vehicle Routing Problem with Time Windows”, in. Desaulniers, G.; Desrosiers, J.; Solomon, M.M., chapter 3, Springer, 2005.

LUSTOSA, M. C. J., 2002, *Meio Ambiente, Inovação e Competitividade na Indústria Brasileira: A Cadeia Produtiva do Petróleo*. Dissertação de D.Sc, Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

MEZA, E. B. M.; VIANNA, D. S.; MACEDO, A. A.; VIANNA, M. F. D., 2015, “Um modelo matemático para o roteamento de navios aliviadores no escoamento da produção de petróleo.” *Revista Eletrônica Gestão & Saúde*, V. 6, p. 955-70.

NAGATA, Y., 2007 “Edge assembly crossover for the capacitated vehicle routing problem”, in. Springer, *Evolutionary computation in combinatorial optimization*. Berlin Heidelberg. p. 142-153.

NAGATA, Y.; BRÄYSY, O., 2009, “Edge assembly-based memetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem” *Networks*, v. 54, n. 4, p. 205-215.

PETROBRAS. (2015) “*Divulgação dos Resultados – 3º trimestre 2015*”, disponível em <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/resultados-financeiros#topo>> acessado 13 de novembro de 2015.

PISINGER, D., E ROPKE, S., 2006, “A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhaul.” *European Journal of Operational Research* v. 171, p. 750–775.

PISINGER, D., E ROPKE, S., 200, “An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows.” *Transportation Science* v. 40, n. 4, p. 455–472.

PISINGER, D., ROPKE, S., 2007, “A general heuristic for the vehicle routing problem.” *Computers & Operations Research* 34 2403–2435.

PISINGER, D., E ROPKE, S. 2010 *Large neighborhood search*, in: M. Gendreau, J.-Y. Potvin (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*, of *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 146, p. 399–419 Boston.

PRINS, C., 2004, “A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, v. 31, n. 12, p. 1985-2002.

RANGEL, M. R., “*Sistemática para gestão do processo de controle de emergência: Uma aplicação em terminal terrestre de distribuição de petróleo e derivados*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2009

RIBEIRO, G.M., MAURI, G.R., E LORENA, L.A.N.. 2011. “A Simple and Robust Simulated Annealing Algorithm for Scheduling Workover Rigs on Onshore Oil Fields”, *Computers & Industrial Engineering*, v.60, p. 519-526.

RIBEIRO, G.M., LAPORTE, G.. 2012. “An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Computer & Operations Research*, v. 39 (3), p 728-735.

RIBEIRO, D. V. ; e CAMPOS, C. H. “O Transporte de Petróleo e Derivados” *Revista Direito E-Energia* ANO III, V.1.

RIMA. (2015) “Relatório de Impacto Ambiental – Atividade de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural do Polo Pré-Sal da Bacia de Santos – Etapa 2”, Fevereiro, 2014.

SILVA, P. R. 2005. “Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados na Costa Brasileira: Estrutura e Implicações Ambientais.” Dissertação de Mestrado, Ciências em Planejamento Energético, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, A. C., SANTOS, I. C., CONCEIÇÃO, W. L., SILVA, D. J., NASCIMENTO, S., SILVA, V. T., 2011, “Operação offloading: análise preliminar de perigo e os impactos ambientais” *Revista Eletrônica Novo Enfoque*, v. 13; n. 13; p. 207.

REIMANN, M.; DOERNER, K.; HARTL, R. F. D-ants, 2004, “Savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem”, *Computers & Operations Research*, v. 31, n. 4, p. 563-591.

SARACENI, P. P., 2006, “Transporte Marítimo de Petróleo e Derivados”, Interciencia, Rio de Janeiro.

SHAW, P. “A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems”, APES Group, Dept of Computer Science, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 1997.

SOARES, A. C., LEAL, J. E., AZEVEDO, I, R. “*Diagnóstico da rede de distribuição de derivados de petróleo no Brasil e sua representação em um SIG*”, XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Minas Gerais, 2003

THOMAS, J. E., 2004, “Fundamentos de Engenharia de Petróleo”, 2º ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro.

TRANSPETRO S.A., Relatório de Administração Transpetro (2013), disponível em <<http://www.transpetro.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A9D2AFB53C3807401541615EB031707>> acessado em 15 de novembro de 2015.

VIDAL, Thibaut et al. A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research*, v. 60, n. 3, p. 611-624, 2012.

YERGIN, T., *O Petróleo – Uma história mundial de conquistas, poder e dinheiro*, 3º ed., Paz e Terra, São Paulo.

## APÊNDICE I – DADOS DAS PLATAFORMAS

Este apêndice apresenta os dados das demais plataformas utilizadas para formação das instâncias.

Tabela I.1 – Dados de 12 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235

Tabela I.2 – Dados de 14 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70

Tabela I.3 – Dados de 16 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118

Tabela I.4 – Dados de 18 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95

Tabela I.5 – Dados de 20 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95
100	492	26000	24	10	41	73
195	393	31000	28	10	60	111

Tabela I.6 – Dados de 22 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95
100	492	26000	24	10	41	73
195	393	31000	28	10	60	111
140	400	17000	18	10	102	194
162	440	91000	47	10	142	274

Tabela I.7 – Dados de 24 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95
100	492	26000	24	10	41	73
195	393	31000	28	10	60	111
140	400	17000	18	10	102	194
162	440	91000	47	10	142	274
115	397	22000	20	10	128	246
190	491	21000	18	10	123	235

Tabela I.8 – Dados de 26 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95
100	492	26000	24	10	41	73
195	393	31000	28	10	60	111
140	400	17000	18	10	102	194
162	440	91000	47	10	142	274
115	397	22000	20	10	128	246
190	491	21000	18	10	123	235
170	500	36000	15	10	40	70
90	398	47000	18	10	83	157

Tabela I.9 – Dados de 28 plataformas

Localização		Demanda	Tempo de Atendimento (h)	Instante inicial da janela de tempo (h)	Instante final da janela de tempo sem multa (h)	Instante final da janela de tempo (h)
229	255	49000	27	10	120	229
70	500	36000	21	10	40	70
90	398	47000	25	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
103	490	36000	20	10	104	197
110	395	71000	25	10	53	95
130	492	67000	24	10	41	73
115	493	81000	30	10	60	111
140	385	45000	24	10	102	194
142	440	43000	22	10	142	274
145	397	54000	26	10	128	246
170	491	45000	24	10	123	235
229	270	22000	19	10	120	229
70	510	15000	15	10	40	70
40	398	14000	18	10	83	157
100	305	40000	28	10	64	118
103	390	12000	15	10	104	197
130	395	19000	25	10	53	95
100	492	26000	24	10	41	73
195	393	31000	28	10	60	111
140	400	17000	18	10	102	194
162	440	91000	47	10	142	274
115	397	22000	20	10	128	246
190	491	21000	18	10	123	235
170	500	36000	15	10	40	70
90	398	47000	18	10	83	157
100	292	79000	28	10	64	118
93	490	36000	15	10	104	197

## APÊNDICE II – GRÁFICOS DE RESULTADOS MEZA E MULTI

Este apêndice apresenta os demais gráficos dos resultados dos modelos de Meza *et al.* (2015) e o multi terminais.

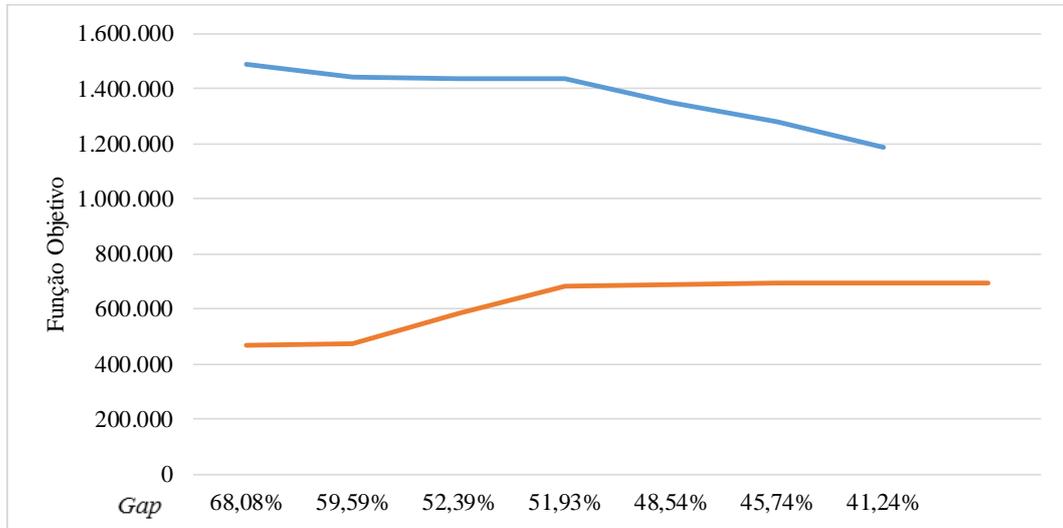


Figura II.1: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 2.

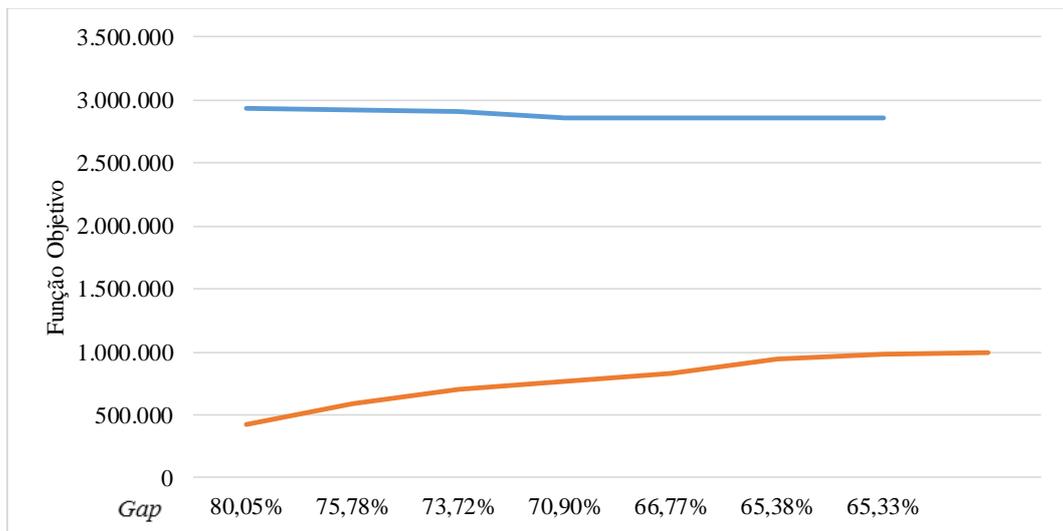


Figura II.2: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 2.

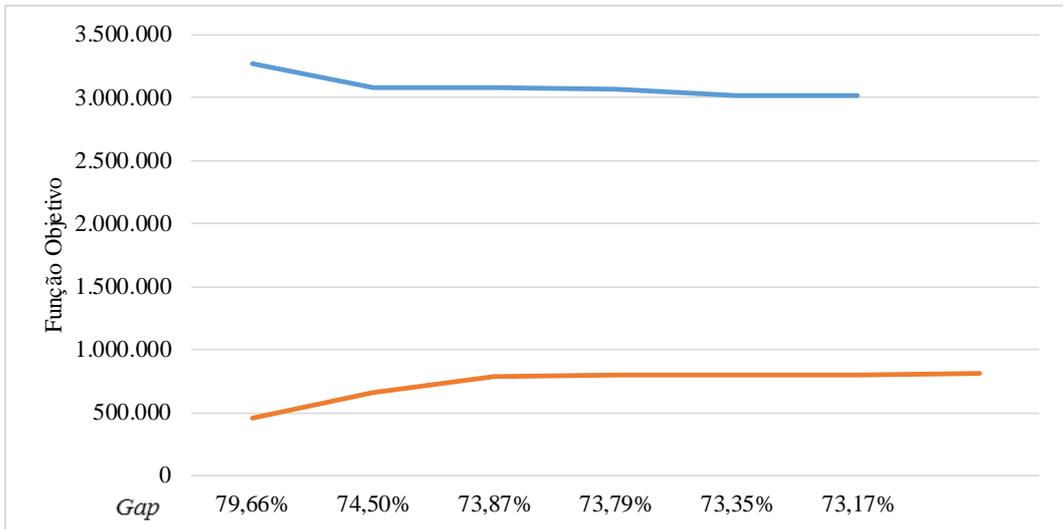


Figura II.3: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 3.

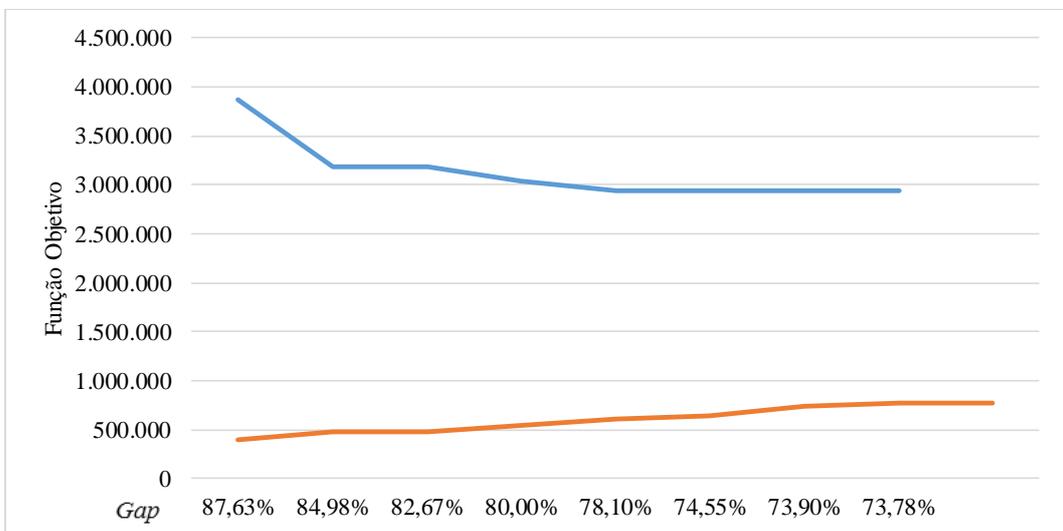


Figura II.4: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 3.

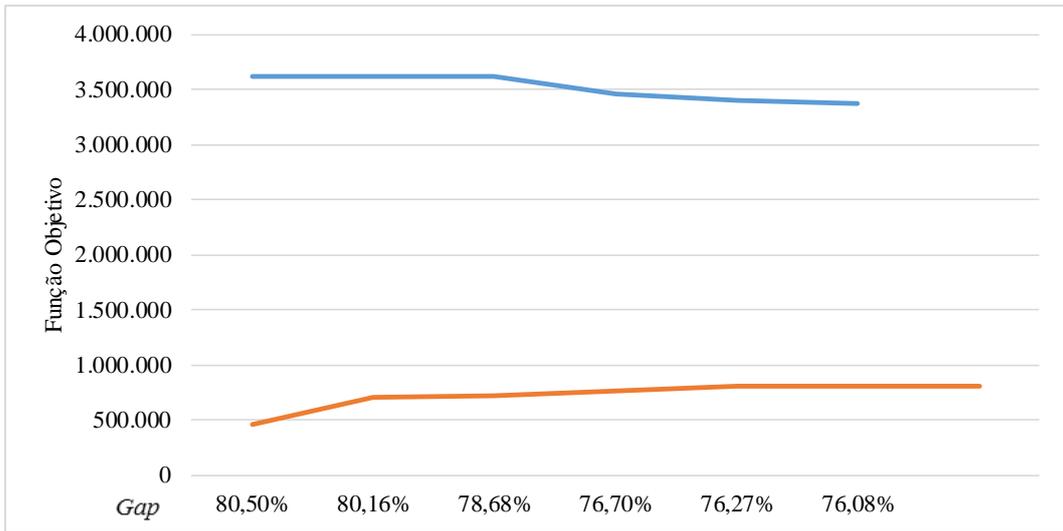


Figura II.5: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 4.

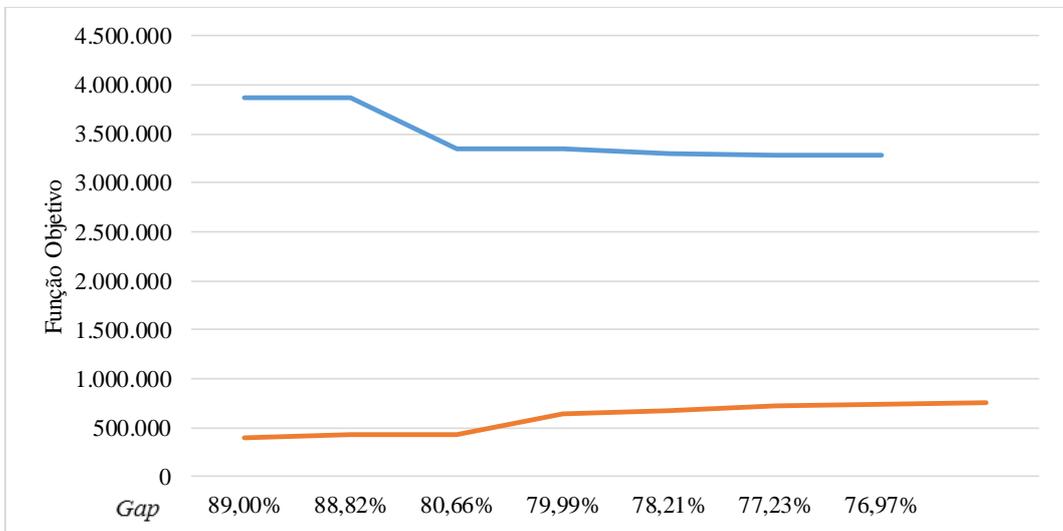


Figura II.6: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 4.

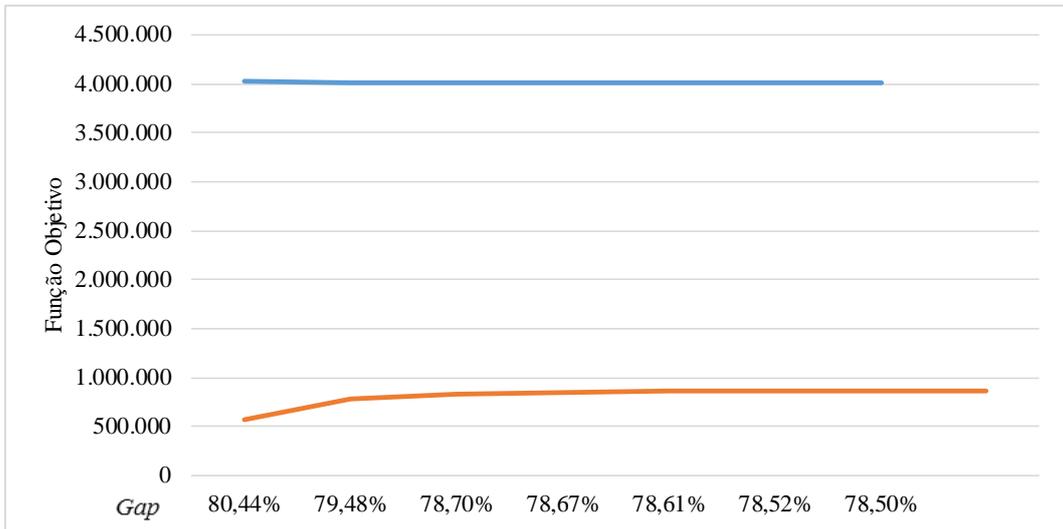


Figura II.7: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 6.

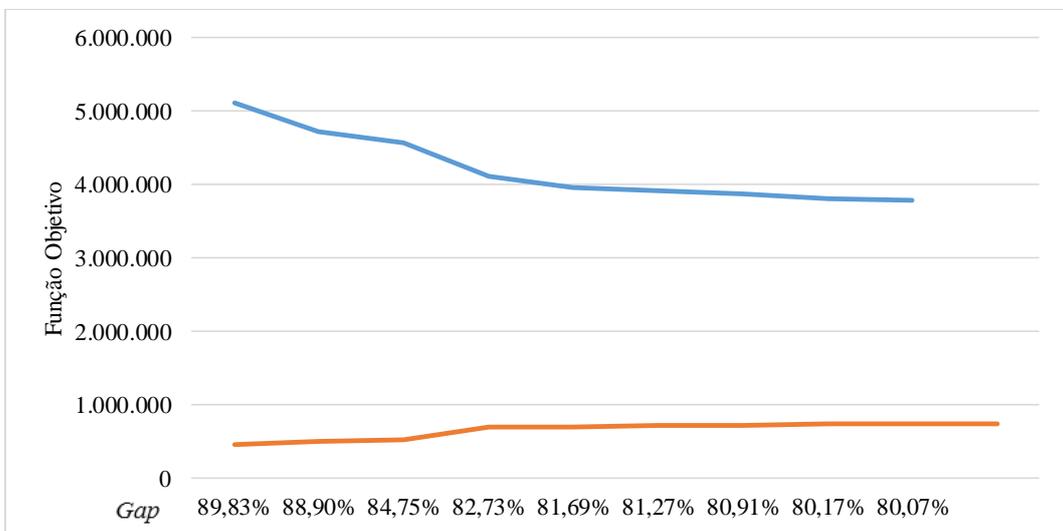


Figura II.8: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 6.

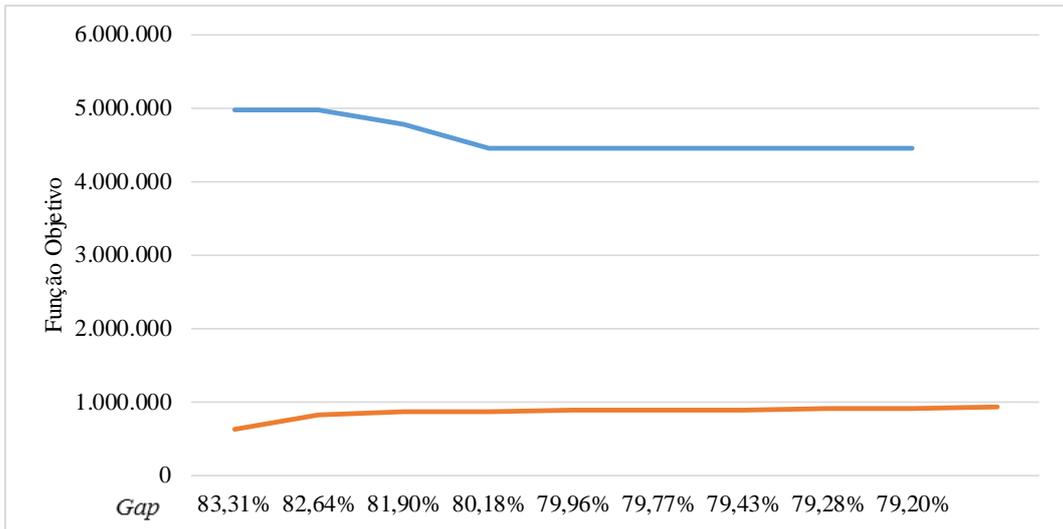


Figura II.9: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 7.

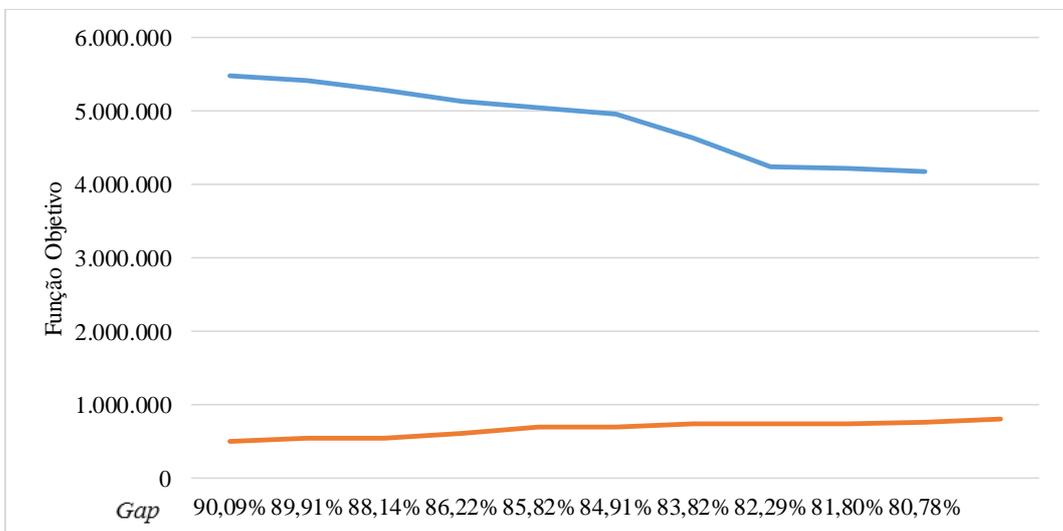


Figura II.10: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 7.

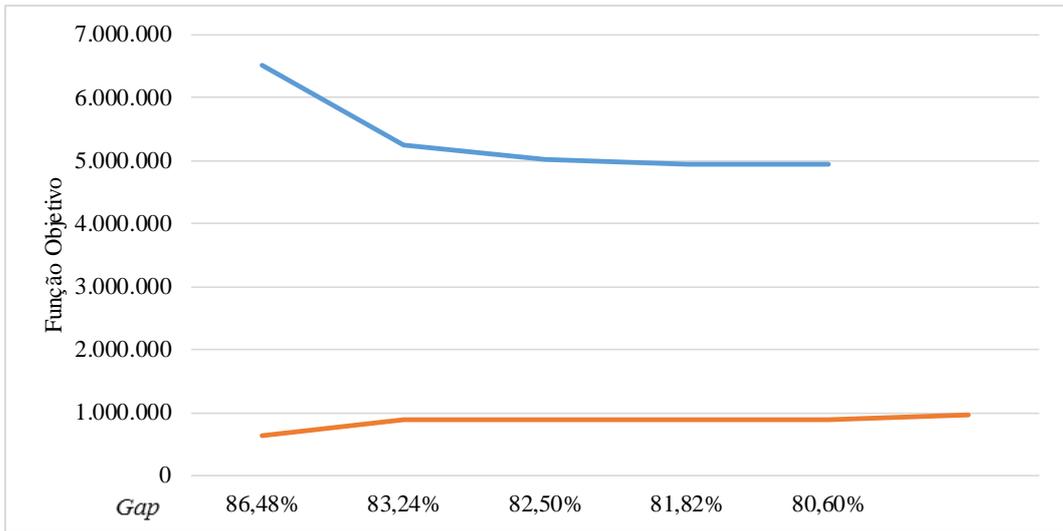


Figura II.11: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 8.

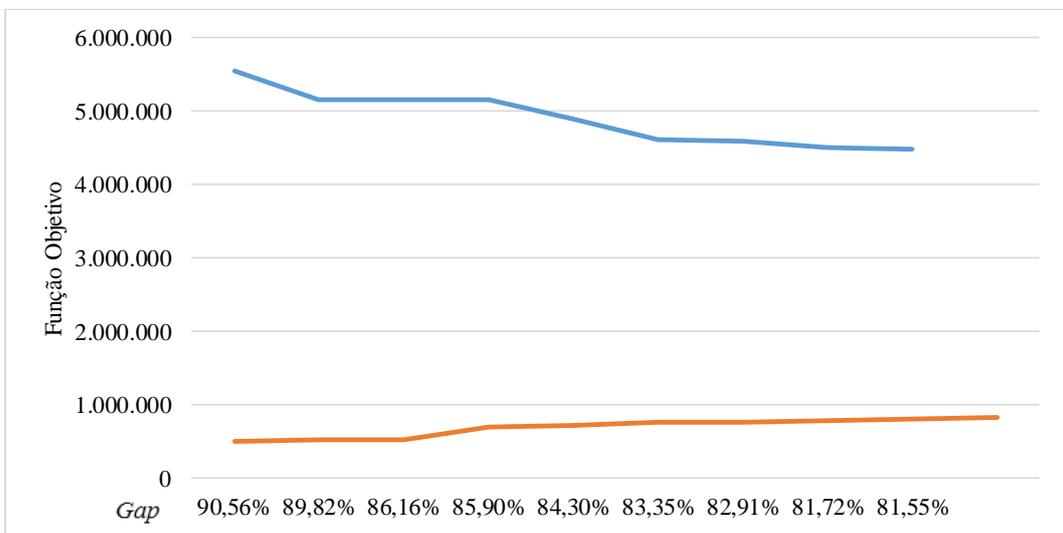


Figura II.12: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 8.

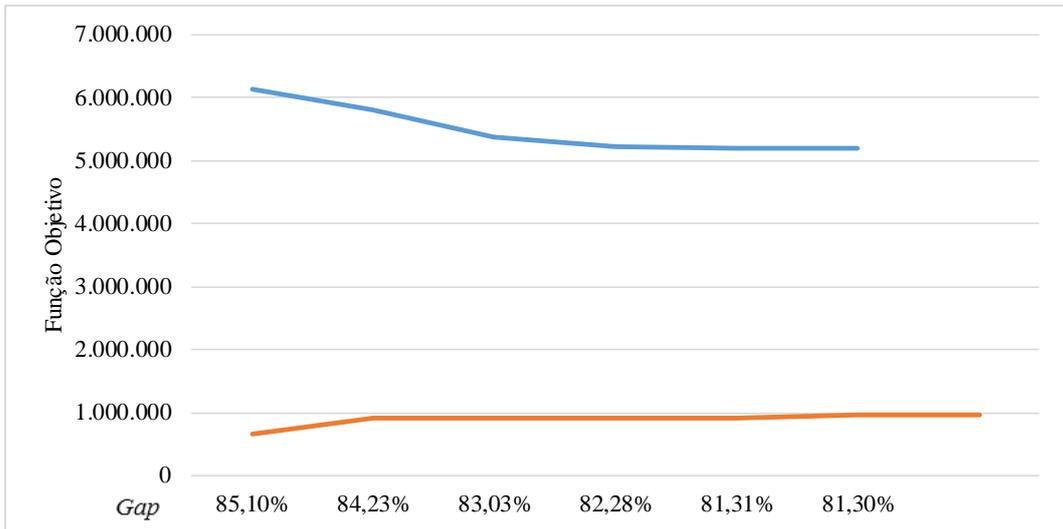


Figura II.13: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo proposto por Meza *et al.* (2015) – Instancia 9.

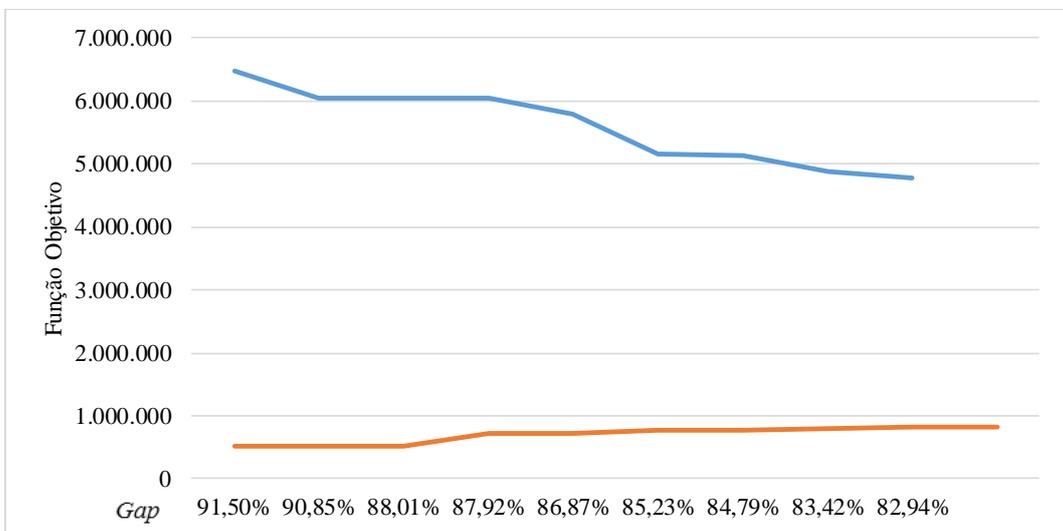


Figura II.14: Comparação de *upper* e *lower bound* do modelo multi – Instancia 9.

### APÊNDICE III – TABELA DE RESULTADOS ALNS

Este Apêndice apresenta os resultados das 15 execuções do ALNS.

Tabela III.1 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 1 e 2 com apenas um terminal

Instancia 1			Instancia 2		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	2539475,00	1,02	0	2.927.487,25	0,83
1	2539224,75	0,91	1	2.939.169,00	0,73
2	2539324,75	0,93	2	2.933.040,00	0,75
3	2539325,25	0,92	3	3.003.547,50	0,75
4	2539381,75	0,93	4	2.927.350,00	0,73
5	2539334,25	0,92	5	2.944.460,25	0,74
6	2539930,00	0,93	6	2.959.872,00	0,73
7	2539264,25	0,91	7	2.928.057,00	0,73
8	2539262,75	0,93	8	2.928.128,50	0,72
9	2539261,00	0,92	9	2.927.390,50	0,73
10	2539239,00	0,93	10	2.935.255,00	0,74
11	2539339,25	0,91	11	2.927.339,50	0,73
12	2539276,00	0,92	12	2.935.316,25	0,72
13	2539307,25	0,91	13	2.936.035,50	0,74
14	2539248,00	0,92	14	2.940.023,50	0,73
Média	2539346,22	0,93	Média	2.939.498,12	0,74

Tabela III.2 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 3 e 4 com apenas um terminal

Instancia 3			Instancia 4		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	3.007.537,50	1,05	0	3.309.810,75	1,19
1	3.010.564,00	0,96	1	3.309.814,25	1,15
2	3.006.390,00	0,93	2	3.309.748,00	1,17
3	3.007.519,25	0,94	3	3.316.302,75	1,18
4	3.020.020,75	0,95	4	3.327.180,00	1,17
5	3.010.588,75	0,95	5	3.309.706,50	1,27
6	3.010.545,00	0,94	6	3.320.027,75	1,24
7	3.007.470,50	0,94	7	3.324.025,50	1,33
8	3.010.528,25	0,95	8	3.316.366,50	1,16
9	3.006.374,00	0,94	9	3.324.009,50	1,19
10	3.010.546,00	0,95	10	3.318.100,75	1,16
11	3.007.518,00	0,94	11	3.320.054,00	1,23
12	3.007.485,50	0,95	12	3.309.734,00	1,27
13	3.040.480,00	0,93	13	3.316.420,00	1,22
14	3.010.586,00	0,95	14	3.309.804,25	1,14
Média	3.011.610,23	0,95	Média	3.316.073,63	1,20

Tabela III.3 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 5 e 6 com apenas um terminal

Instancia 5			Instancia 6		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	3.408.036,75	1,55	0	3.610.365,00	1,86
1	3.385.406,50	1,43	1	3.690.422,00	1,75
2	3.406.451,50	1,41	2	3.719.292,25	2,19
3	3.410.920,25	1,41	3	3.665.701,00	1,94
4	3.410.881,00	1,40	4	3.685.995,00	1,83
5	3.408.100,00	1,42	5	3.630.689,00	1,85
6	3.408.077,25	1,40	6	3.714.713,75	1,86
7	3.407.991,25	1,41	7	3.692.796,00	1,85
8	3.410.884,50	1,42	8	3.674.298,75	1,75
9	3.406.371,25	1,40	9	3.667.382,50	1,71
10	3.407.858,50	1,43	10	3.670.500,25	1,73
11	3.408.021,75	1,41	11	3.681.184,50	1,72
12	3.406.363,00	1,50	12	3.725.049,00	1,72
13	3.412.067,50	1,38	13	3.616.513,00	1,72
14	3.407.984,00	1,41	14	3.673.555,25	1,71
Média	3.407.027,67	1,43	Média	3.674.563,82	1,81

Tabela III.4 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 7 e 8 com apenas um terminal

Instancia 7			Instancia 8		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	4.092.467,50	1,90	0	4.357.920,50	2,36
1	4.096.873,00	1,90	1	4.321.001,00	2,23
2	4.092.978,50	1,89	2	4.363.597,50	2,22
3	4.115.613,75	1,88	3	4.376.692,50	2,24
4	4.094.414,50	1,93	4	4.328.314,00	2,22
5	4.108.494,75	1,89	5	4.337.438,00	2,25
6	4.126.905,25	1,89	6	4.331.084,00	2,21
7	4.115.598,75	1,89	7	4.318.252,00	2,24
8	4.081.685,25	1,88	8	4.372.912,50	2,23
9	4.095.948,75	1,89	9	4.342.841,00	2,24
10	4.117.448,25	1,90	10	4.330.530,50	2,23
11	4.119.319,75	1,90	11	4.348.866,00	2,30
12	4.092.566,25	1,90	12	4.372.765,50	2,22
13	4.099.762,25	1,88	13	4.270.106,00	2,22
14	4.082.083,00	1,90	14	4.289.671,00	2,22
Média	4.102.143,97	1,89	Média	4.337.466,13	2,24

Tabela III.5 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 9 e 10 com apenas um terminal

Instancia 9			Instancia 10		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	4.658.149,50	2,54	0	5.134.366,50	3,00
1	4.671.586,50	2,42	1	5.090.633,00	2,90
2	4.623.606,50	2,43	2	5.081.777,50	2,90
3	4.616.787,00	2,44	3	5.109.185,00	2,89
4	4.709.857,00	2,41	4	5.073.104,50	2,92
5	4.725.600,50	2,42	5	5.058.279,50	2,87
6	4.635.516,00	2,43	6	5.058.662,50	2,88
7	4.674.065,50	2,42	7	5.063.914,00	2,89
8	4.650.869,50	2,45	8	5.054.454,00	2,94
9	4.711.019,00	2,44	9	5.081.643,00	2,89
10	4.665.646,00	2,44	10	5.099.018,00	2,89
11	4.708.141,00	2,51	11	5.087.557,50	3,08
12	4.668.753,00	2,43	12	5.074.067,50	3,19
13	4.677.418,00	2,41	13	5.098.074,50	2,96
14	4.691.204,00	2,40	14	5.100.303,00	2,96
Média	4.672.547,93	2,44	Média	5.084.336,00	2,94

Tabela III.6 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 1 e 2 com apenas dois terminais

Instancia 1			Instancia 2		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	2.527.324,50	0,61	0	2.944.361,50	0,84
1	2.526.965,75	0,62	1	2.933.317,00	0,74
2	2.526.969,75	0,60	2	2.948.310,50	0,73
3	2.526.990,50	0,59	3	2.932.399,50	0,73
4	2.526.969,75	0,60	4	2.919.284,00	0,75
5	2.527.674,75	0,58	5	2.960.592,75	0,73
6	2.526.971,25	0,59	6	2.927.192,00	0,72
7	2.527.283,50	0,59	7	2.932.256,00	0,73
8	2.527.275,50	0,59	8	2.963.043,50	0,73
9	2.526.988,25	0,59	9	2.940.594,00	0,72
10	2.527.291,50	0,59	10	2.935.434,00	0,73
11	2.527.283,50	0,59	11	2.931.649,50	0,74
12	2.527.036,00	0,59	12	2.933.365,00	0,73
13	2.526.977,25	0,59	13	2.932.031,00	0,75
14	2.527.299,25	0,60	14	2.955.824,00	0,73
Média	2.527.153,40	0,60	Média	2.939.310,28	0,74

Tabela III.7 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 3 e 4 com apenas dois terminais

Instancia 3			Instancia 4		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	3.016.063,75	1,05	0	3.295.300,50	1,18
1	3.009.379,75	0,95	1	3.298.392,00	1,16
2	3.012.725,75	0,96	2	3.300.087,50	1,17
3	3.015.550,75	0,94	3	3.296.829,50	1,19
4	3.015.551,25	0,95	4	3.295.293,25	1,16
5	3.004.861,75	0,94	5	3.301.518,00	1,16
6	3.007.946,25	0,94	6	3.290.423,00	1,14
7	3.009.369,25	0,95	7	3.310.291,00	1,15
8	3.007.958,50	0,94	8	3.308.250,25	1,15
9	3.002.052,00	0,95	9	3.293.466,00	1,15
10	2.999.949,75	0,94	10	3.293.462,50	1,17
11	3.009.811,25	0,95	11	3.293.440,75	1,16
12	3.004.299,75	0,95	12	3.296.820,25	1,16
13	3.006.625,25	0,95	13	3.316.953,00	1,16
14	3.049.540,75	0,95	14	3.310.776,50	1,17
Média	3.011.445,72	0,95	Média	3.300.086,93	1,16

Tabela III.8 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 5 e 6 com apenas dois terminais

Instancia 5			Instancia 6		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	3.400.188,00	1,44	0	3.666.486,25	1,76
1	3.388.305,75	1,42	1	3.691.315,25	1,73
2	3.373.041,00	1,44	2	3.722.310,50	1,72
3	3.388.274,00	1,44	3	3.719.117,75	1,77
4	3.406.211,50	1,42	4	3.681.932,25	1,74
5	3.409.335,50	1,44	5	3.700.026,50	1,73
6	3.369.596,00	1,43	6	3.640.308,00	1,73
7	3.373.475,50	1,43	7	3.695.911,75	1,72
8	3.393.671,25	1,42	8	3.723.601,00	1,73
9	3.369.216,25	1,44	9	3.677.876,50	1,73
10	3.386.628,25	1,42	10	3.648.081,75	1,72
11	3.410.193,75	1,43	11	3.703.564,25	1,72
12	3.370.914,25	1,42	12	3.702.915,50	1,72
13	3.399.952,25	1,42	13	3.633.705,75	1,73
14	3.420.691,50	1,41	14	3.684.154,25	1,71
Média	3.390.646,32	1,43	Média	3.686.087,15	1,73

Tabela III.9 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 7 e 8  
com apenas dois terminais

Instancia 7			Instancia 8		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	4.082.927,25	2,00	0	4.304.085,00	2,50
1	4.087.482,25	1,90	1	4.334.488,00	2,43
2	4.078.731,50	1,93	2	4.325.098,50	2,25
3	4.102.484,25	1,90	3	4.368.801,50	2,21
4	4.093.559,00	1,89	4	4.316.505,50	2,22
5	4.102.840,25	2,15	5	4.346.588,50	2,19
6	4.083.893,50	1,93	6	4.301.434,00	2,21
7	4.099.308,75	1,95	7	4.308.771,00	2,22
8	4.113.238,25	1,89	8	4.334.621,50	2,23
9	4.096.401,00	1,93	9	4.343.148,00	2,22
10	4.073.683,25	1,90	10	4.290.294,00	2,20
11	4.078.519,25	1,90	11	4.282.859,50	2,20
12	4.094.931,25	2,09	12	4.298.951,00	2,24
13	4.087.713,25	2,02	13	4.354.651,50	2,25
14	4.114.292,00	2,11	14	4.300.656,50	2,23
Média	4.092.667,00	1,96	Média	4.320.730,27	2,25

Tabela III.10 – Apresenta os valores encontrados nas 15 execuções das instâncias 9 e 10  
com apenas dois terminais

Instancia 9			Instancia 10		
nº	FO	Tempo	nº	FO	Tempo
0	4.669.584,50	2,58	0	5.062.938,00	2,90
1	4.658.592,50	2,46	1	5.058.719,00	2,88
2	4.668.676,50	2,44	2	5.055.242,50	2,91
3	4.662.166,00	2,40	3	5.084.897,00	2,89
4	4.690.100,00	2,45	4	5.063.946,00	2,87
5	4.666.212,50	2,43	5	5.080.363,50	2,88
6	4.689.754,00	2,40	6	5.068.012,00	2,90
7	4.735.529,00	2,42	7	5.062.177,00	2,89
8	4.649.521,50	2,43	8	5.098.337,50	2,87
9	4.627.984,50	2,46	9	5.058.830,50	2,93
10	4.648.386,50	2,47	10	5.104.169,50	2,88
11	4.661.958,50	2,43	11	5.069.854,50	2,96
12	4.620.994,50	2,40	12	5.065.440,00	2,86
13	4.657.641,50	2,40	13	5.052.962,50	2,87
14	4.606.678,50	2,45	14	5.060.444,00	2,88
Média	4.660.918,70	2,44	Média	5.069.755,57	2,89