



## O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE BERÇOS PORTUÁRIOS PARA OPERAÇÕES DE SUPRIMENTO OFFSHORE

Rennan Danilo Seimetz Chagas

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

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Mai de 2015

O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE BERÇOS PORTUÁRIOS PARA  
OPERAÇÕES DE SUPRIMENTO OFFSHORE

Rennan Danilo Seimetz Chagas

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 PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Virgílio Jose Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Prof<sup>a</sup>. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

---

Prof. Artur Alves Pessoa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2015

Chagas, Rennan Danilo Seimetz

O problema de programação de berços portuários para operações de suprimento /Rennan Danilo Seimetz Chagas. - Rio de Janeiro, 2015.

X, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 64-66.

1. Programação Inteira. 2. Programação de Berços. 3. Logística offshore. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Zulmira e Danilo, pela dedicação, todo incentivo que sempre me deram com relação aos estudos e por todos os castigos que precisei até aprender a tabuada. Tudo o que fizeram permitiu que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu professor e orientador, Virgílio, por todos os conselhos e paciência na elaboração desse trabalho e por proporcionar um ambiente tão bom como o LORDE para desenvolvimento de pesquisas e projetos.

Aos professores Laura Bahiense, Edilson Arruda e também ao Bruno Vieira por toda contribuição no projeto do qual essa dissertação fez parte.

Mais uma vez a professora Laura e também ao professor Artur Pessoa por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

Aos meus colegas e grandes amigos do projeto, Gustavo, Juliana, Miranda, Rafael, Sayuri e Tales, que tornaram o trabalho no projeto e na dissertação algo muito mais leve e prazeroso. E como esquecer da mãe da Sayuri? Dona Luciana, obrigado por todos os bolos de aniversário e salgadinhos que a senhora fez!

Aos grandes amigos que fiz pelas disciplinas do mestrado, em especial ao Daniel Mazza. Ouvimos os xingamentos um do outro cada vez que um programa que fazíamos não funcionava e também trocamos muitas dicas para a elaboração da dissertação de cada um.

Ao Seu Zé por sempre deixar uma jarra cheia de café pronta na copa antes de ir embora e ao Vicente no cuidado com o servidor e pelas boas conversas no laboratório.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e a Petrobras pelo auxílio financeiro. Produzir e divulgar conhecimento custa caro, e o financiamento foi muito importante para viabilizar a elaboração deste trabalho.

E a todos os parentes e amigos que durante meu mestrado tiveram que aceitar minha ausência em festas, bares e encontros porque eu precisava estudar, terminar um trabalho ou escrever a dissertação.

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

## O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE BERÇOS PORTUÁRIOS PARA OPERAÇÕES DE SUPRIMENTO OFFSHORE

Rennan Danilo Seimetz Chagas

Maio/2015

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

A exploração e produção do petróleo no Brasil ocorre de forma muito concentrada em unidades *offshore*. A produção de petróleo na Bacia de Campos em 2013 chegou a 102.744.128 m<sup>3</sup>, representando 85,66% da produção nacional. Essa concentração da produção em unidades marítimas deve aumentar ainda mais com o progresso das explorações em campos do pré-sal. Por conta disso, desenvolver mecanismos para tomada de decisão quanto a melhor forma de definir horários de saída das embarcações de suprimentos é de considerável relevância para garantir eficiência e confiabilidade nas operações. Este trabalho tem como objetivo apresentar e avaliar modelos de programação inteira mista para programação de berços portuários. Nesse trabalho o problema foi modelado levando em consideração as restrições de compatibilidade das atracções com os berços, paradas para manutenção, precedência entre viagens e o espaçamento adequado entre as mesmas para manter uma distribuição equilibrada entre as entregas nas unidades. Foram desenvolvidos três tipos de formulação para o problema, das quais duas foram testadas em instâncias com intuito de escolher a que melhor se adequa para o problema real. O modelo se mostrou muito útil para aplicações realistas reduzindo o tempo de planejamento de dias para poucas horas podendo atingir a casa dos segundos em alguns casos.

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

## THE BERTH SCHEDULING PROBLEM FOR PORT OFFSHORE SUPPLY OPERATIONS

Rennan Danilo Seimetz Chagas

May/2015

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

The exploration and production of oil in Brazil is very concentrated in offshore units. Oil production in the Campos Basin in 2013 reached 102 744 128 m<sup>3</sup>, representing 85.66% of the national production. This concentration of production in marine units should further increase with the progress of exploitation in the pre-salt fields. Because of this, developing mechanisms for decision making to better define departure times of supply vessels has considerable importance to ensure efficiency and reliability in operations. This study aims to present and evaluate models of mixed integer programming for scheduling of port berths. In this work the problem was modeled taking into account the constraints of mooring compatibility with berths, maintenance shutdowns, precedence between moorings and proper spacing between them to maintain a balanced distribution between deliveries in units. Three types of formulation were developed for the problem, two of which were tested on instances with the aim of choosing the best suited to the real problem. The model proved to be very useful for realistic applications, reducing the planning time from day to a few hours and reaching seconds in some cases.

# SUMÁRIO

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUÇÃO.....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO DO TEMA .....	4
1.2	OBJETIVOS.....	6
1.3	ESTRUTURA.....	6
<b><u>2</u></b>	<b><u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u></b>	<b><u>8</u></b>
2.1	LOGÍSTICA <i>OFFSHORE</i> .....	8
2.2	PROGRAMAÇÃO DE BERÇOS .....	9
<b><u>3</u></b>	<b><u>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E FORMULAÇÕES .....</u></b>	<b><u>14</u></b>
3.1	FORMULAÇÕES DO PROBLEMA .....	19
3.1.1	FORMULAÇÕES COM VARIÁVEIS DE ORDENAÇÃO .....	19
3.1.2	FORMULAÇÕES COM VARIÁVEIS DE SEQUENCIAMENTO .....	26
<b><u>4</u></b>	<b><u>EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE.....</u></b>	<b><u>33</u></b>
4.1	METODOLOGIA .....	33
4.1.1	FLUXOGRAMA DE DADOS E IMPLEMENTAÇÃO .....	34
4.1.2	PRÉ-PROCESSAMENTO DO MODELO DE ORDENAÇÃO .....	38
4.2	ANÁLISE DO MODELO MATEMÁTICO COM VARIÁVEIS DE ORDENAÇÃO .....	40
4.2.1	ANÁLISE DO MODELO EM FUNÇÃO DOS DADOS .....	43
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS COM VARIÁVEIS DE ORDENAÇÃO E SEQUENCIAMENTO.....	44
4.4	ANÁLISE DO MODELO EM SITUAÇÕES REALISTAS .....	51
4.4.1	SEM CONJUGADOS E COM CONJUGADOS.....	52
4.4.2	AUMENTO DE CAPACIDADE.....	57
<b><u>5</u></b>	<b><u>CONCLUSÕES .....</u></b>	<b><u>61</u></b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	63
<b><u>6</u></b>	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>64</u></b>
	<b><u>APÊNDICE A.....</u></b>	<b><u>67</u></b>
	<b><u>APÊNDICE B.....</u></b>	<b><u>72</u></b>
	<b><u>APÊNDICE C.....</u></b>	<b><u>78</u></b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: UNIDADES <i>OFFSHORE</i> NA BACIA DE CAMPOS ATENDIDAS POR ÍMBETIBA .....	1
FIGURA 1.2: PORTO DE ÍMBETIBA – MACAÉ/RJ .....	2
FIGURA 1.3: EMBARCAÇÃO PSV PARA OPERAÇÕES DE SUPRIMENTO .....	3
FIGURA 1.4: REDE LOGÍSTICA DAS OPERAÇÕES DE SUPRIMENTO <i>OFFSHORE</i> .....	3
FIGURA 1.5: METAS DE PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS (PLANO DE NEGÓCIOS 2013-2017) .....	5
FIGURA 2.1: ARRANJO DISCRETO .....	10
FIGURA 2.2: ARRANJO CONTÍNUO .....	10
FIGURA 2.3: ARRANJO HÍBRIDO .....	10
FIGURA 3.1: REPRESENTAÇÃO DE UM <i>CLUSTER</i> .....	15
FIGURA 3.2: REPRESENTAÇÃO DE <i>CLUSTERS</i> CONJUGADOS .....	16
FIGURA 3.3: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA SOLUÇÃO .....	18
FIGURA 4.1: FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO DO MODELO DE SEQUENCIAMENTO .....	35
FIGURA 4.2: CONJUNTO DE DADOS REALISTAS COMPLETO .....	35
FIGURA 4.3: FLUXOGRAMA DE PROCESSOS DA PLANILHA DE DADOS .....	36
FIGURA 4.4: FLUXOGRAMA DE PROCESSOS DA INTERFACE EM AIMMS .....	37
FIGURA 4.5: INTERFACE GRÁFICA EM AIMMS .....	38
FIGURA 4.6: EVOLUÇÃO DOS LIMITANTES SUPERIOR E INFERIOR POR TEMPO DE PROCESSAMENTO – ÓTIMO EM 681 s .....	41
FIGURA 4.7: SOLUÇÃO VIÁVEL PARA PRIMEIRO CONJUNTO DE DADOS .....	42
FIGURA 4.8: SOLUÇÃO VIÁVEL PARA O PROBLEMA COM AUMENTO DO TEMPO DE ATRACAÇÃO .....	43
FIGURA 4.9: TEMPO DE PROCESSAMENTO X Nº DE ATRACAÇÕES POR NÍVEL DE OCIOSIDADE - MODELO DE SEQUENCIAMENTO .....	47
FIGURA 4.10: TEMPO DE PROCESSAMENTO X Nº DE ATRACAÇÕES POR NÍVEL DE OCIOSIDADE - MODELO DE ORDENAÇÃO .....	47
FIGURA 4.11: TEMPO DE PROCESSAMENTO COM OCIOSIDADE MÉDIA DO PORTO X Nº ATRACAÇÕES PARA OS DOIS MODELOS .....	48
FIGURA 4.12: TEMPO DE PROCESSAMENTO COM OCIOSIDADE ALTA DO PORTO X Nº ATRACAÇÕES PARA OS DOIS MODELOS .....	48
FIGURA 4.13: QUANTIDADE DE VARIÁVEIS POR INSTÂNCIA .....	49
FIGURA 4.14: QUANTIDADE DE RESTRIÇÕES POR INSTÂNCIA .....	49
FIGURA 4.15: DIMENSÃO DA MATRIZ DO PROBLEMA POR INSTÂNCIAS .....	50
FIGURA 4.16: PROGRAMAÇÃO COMPLETA SEM <i>CLUSTERS</i> CONJUGADOS .....	53
FIGURA 4.17: SOLUÇÃO VIÁVEL E TEMPO DE PROCESSAMENTO POR SOLUÇÃO ENCONTRADA NO CASO SEM CONJUGADOS .....	54
FIGURA 4.18: TAXA DE OCUPAÇÃO DOS BERÇOS NO CASO SEM CONJUGADOS .....	54
FIGURA 4.19: PROGRAMAÇÃO COMPLETA COM <i>CLUSTERS</i> CONJUGADOS .....	55
FIGURA 4.20: SOLUÇÃO VIÁVEL E TEMPO DE PROCESSAMENTO POR SOLUÇÃO ENCONTRADA NO CASO COM CONJUGADOS .....	55
FIGURA 4.21: TAXA DE OCUPAÇÃO DOS BERÇOS NO CASO COM CONJUGADOS .....	56
FIGURA 4.22: SOLUÇÕES ENCONTRADAS AO LONGO DO PROCESSAMENTO - TEMPO EM ESCALA LOGARÍTMICA .....	57
FIGURA 4.23: PROGRAMAÇÃO COMPLETA COM AUMENTO DE CAPACIDADE E SEM <i>CLUSTERS</i> CONJUGADOS .....	58



FIGURA 4.24: SOLUÇÃO VIÁVEL E TEMPO DE PROCESSAMENTO POR SOLUÇÃO ENCONTRADA NO CASO AUMENTO DE CAPACIDADE SEM CONJUGADOS.....	58
FIGURA 4.25: TAXA DE OCUPAÇÃO DOS BERÇOS NO CASO AUMENTO SEM CONJUGADOS .	59
FIGURA 4.26: PROGRAMAÇÃO COMPLETA COM AUMENTO DE CAPACIDADE E COM <i>CLUSTERS</i> CONJUGADOS .....	59
FIGURA 4.27: SOLUÇÃO VIÁVEL E TEMPO DE PROCESSAMENTO POR SOLUÇÃO ENCONTRADA NO CASO AUMENTO DE CAPACIDADE COM CONJUGADOS .....	60
FIGURA 4.28: TAXA DE OCUPAÇÃO DOS BERÇOS NO CASO AUMENTO DE CAPACIDADE COM CONJUGADOS .....	60

# LISTA DE TABELAS

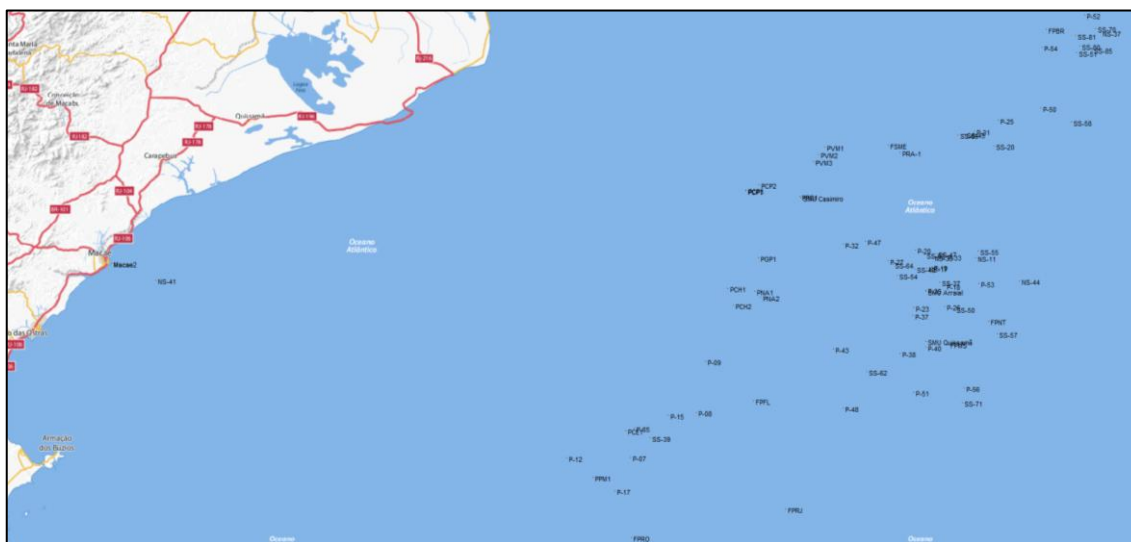
TABELA 2.1: TABELA SINÓTICA DA PRINCIPAL BIBLIOGRAFIA SOBRE PROGRAMAÇÃO DE BERÇOS PORTUÁRIOS. ....	13
TABELA 3.1: AVALIAÇÃO DE DUAS MÉTRICAS PARA FUNÇÃO OBJETIVO .....	30
TABELA 4.1: ANÁLISE DO DESEMPENHO POR $ o $ .....	40
TABELA 4.2: CONJUNTO DE DADOS NECESSÁRIO PARA O PROBLEMA .....	41
TABELA 4.3: COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO PARA DIFERENTES TEMPOS DE ATRACAÇÃO .....	43
TABELA 4.4: EXEMPLO DOS DADOS PARA A INSTÂNCIA U10_S3_B3 .....	45
TABELA 4.5: RESUMO DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO PARA CADA INSTÂNCIA .....	46
TABELA 4.6: RESUMO DA COMPARAÇÃO DOS MODELOS .....	50
TABELA 4.7: CLUSTERS CONJUGADOS PARA O CASO REALISTA.....	52
TABELA 4.8: RESUMO DOS RESULTADOS PARA OS 4 GRUPOS DE INSTÂNCIAS REALISTAS. ....	52

# 1 Introdução

Num mercado cada vez mais globalizado, a competição empresarial se acirra. Nesse processo de trocas comerciais as decisões devem se pautar em essência pela razão. Na definição da filosofia, a razão pode ser dita um referencial de orientação do homem em todos os campos em que há possibilidade à indagação ou à investigação, podendo se dizer que a razão é uma "faculdade" própria do homem, que o distingue dos animais (ABBAGNANO, 2007). A tarefa primordial da razão é enfrentar conscientemente as limitações que a natureza impõe ao homem, é lutar contra a escassez.

Bens e serviços são escassos e, por sua escassez, faz-se necessário administrá-los de forma racional. É essa busca pela administração racional dos recursos que promove os esforços em tornar os processos de transformação e prestação de serviços mais produtivos e eficientes. O uso racional dos recursos envolve, por consequência, o processo decisório. Decisões são tomadas constantemente em toda a cadeia produtiva de qualquer indústria ou mercado, e são passo fundamental da administração. Na indústria do petróleo, toda essa problemática apresentada não será diferente.

Figura 1.1: Unidades *offshore* na Bacia de Campos atendidas por Imbetiba



As empresas produtoras de petróleo tentam buscar o óleo onde quer que ele esteja, condicionado à viabilidade econômica de sua exploração e produção. No Brasil, foram descobertas ao longo do tempo grandes reservas de petróleo no mar, em especial na Bacia de Campos (Figura 1.1) e mais recentemente nos campos do pré-sal. A distância em relação à costa brasileira, bem como a profundidade em que se encontram as reservas faz com que exista um grande esforço logístico do ponto de vista da operação de suprimentos.

**Figura 1.2: Porto de Imbetiba – Macaé/RJ**



Fonte: Imagem da internet<sup>1</sup>

As unidades dispersas em alto mar possuem demandas por comida, ferramentas tubos entre outros produtos. Essas mercadorias contratadas com fornecedores são concentradas em portos como o de Imbetiba (Figura 1.2) para o carregamento em embarcações do tipo Platform Supply Vessel (PSV) como a mostrada na Figura 1.3. Essas embarcações transportam a carga necessária para as atividades de unidades de

---

<sup>1</sup> Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2014/01/MacaePort.jpg>> Acesso em março de 2015.

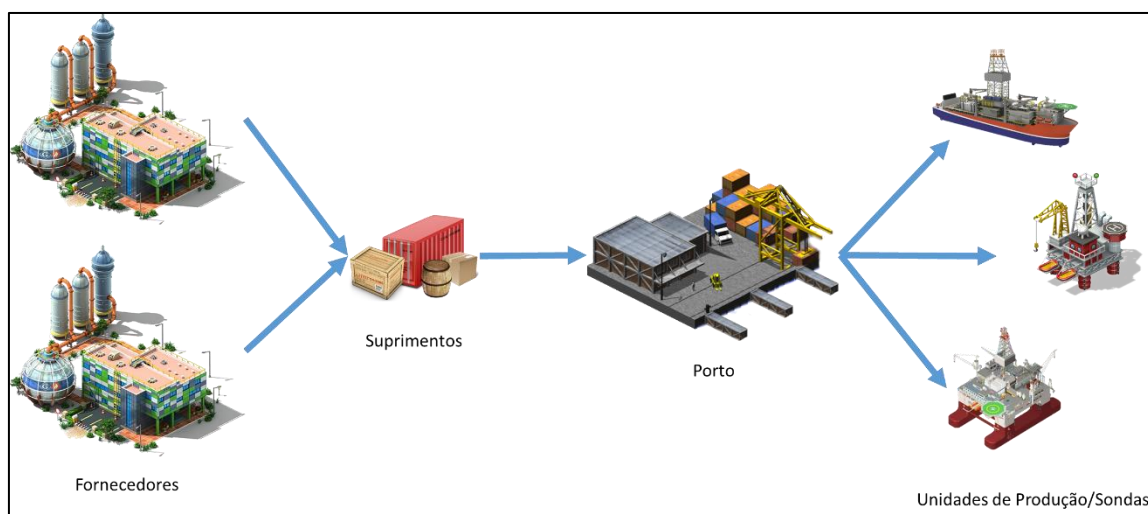
produção e sondas de perfuração. A Figura 1.4 apresenta uma esquematização dessa rede logística.

Figura 1.3: Embarcação PSV para operações de suprimento



Fonte: Imagem de internet<sup>2</sup>

Figura 1.4: Rede logística das operações de suprimento *offshore*



<sup>2</sup> Disponível em: <[http://tidemarine.net/images/gallery/IMG\\_1912.jpg](http://tidemarine.net/images/gallery/IMG_1912.jpg)> Acesso em março de 2015

Um dos pontos centrais desse grupo de atividades logísticas é o porto. Tanto os produtos que precisam ser enviados para as unidades marítimas, quanto as cargas que são trazidas de volta pelas embarcações são carregadas e descarregadas no porto. Esse grande armazém precisa de um bem que é escasso e portanto deve ser muito bem administrado: o tempo. A garantia da entrega dos produtos no prazo esperado pelas unidades de produção, e por consequência a continuidade das atividades dentro do programado, é muito influenciada pela forma como o porto será administrado. Além disso, um planejamento eficiente e produtivo das atividades portuárias permite que o mesmo terminal seja capaz de atender um maior número de unidades marítimas, o que reduz consideravelmente os custos por não precisar construir ou contratar novos terminais.

Dentro do porto existe um número limitado de berços que podem ser utilizados para carregamento das embarcações, nem todos são compatíveis com qualquer tipo de carga. Além disso, existem manutenções programadas, intervalos que devem servir para vistorias de órgãos de fiscalização entre outras atividades. O problema de alocação/programação de berços irá lidar justamente com esse grupo de decisões e é o objeto de estudo desta dissertação.

## **1.1 Justificativa e motivação do tema**

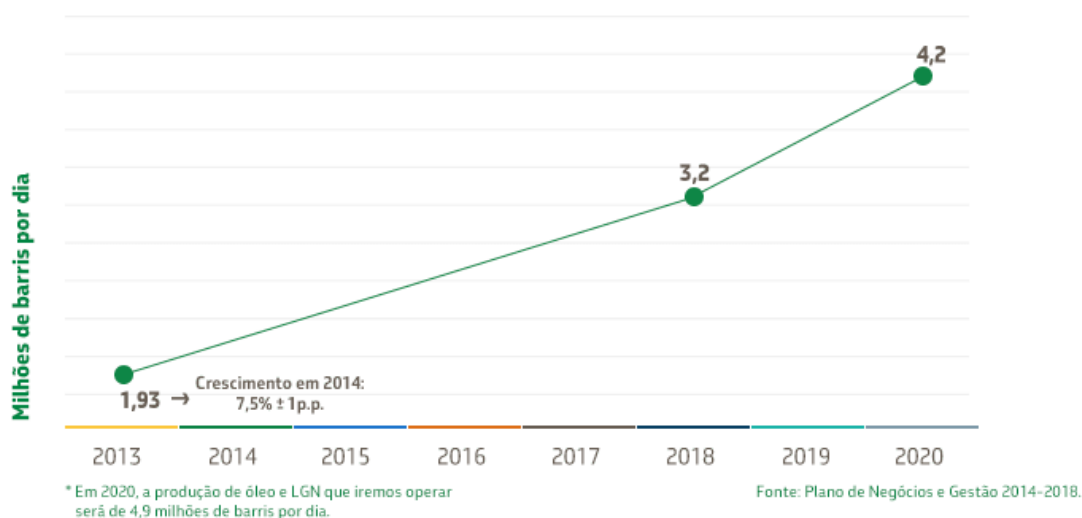
A expectativa de crescimento da produção petrolífera brasileira nos próximos anos, especialmente com a confirmação do potencial das reservas do pré-sal localizado nas Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo, podem elevar a produção de aproximadamente 2 milhões b/d de óleo em 2011 a 4,2 milhões b/d em 2020 no Brasil (Figura 1.5), onde a previsão é que seja extraído dos campos do pré-sal metade deste valor, segundo o Plano de Negócios da Petrobrás 2013-2017 (PETROBRAS, 2013).

A exploração e produção do petróleo no Brasil ocorre de forma muito concentrada em unidades *offshore*. A produção de petróleo na Bacia de Campos em 2013 chegou a 102.744.128 m<sup>3</sup>, representando 85,66% da produção nacional. A quantidade de unidades marítimas deve aumentar ainda mais com a exploração comercial dos campos do pré-sal (ANP, 2013).



Figura 1.5: Metas de produção de óleo e gás (Plano de negócios 2013-2017)

### Metas de produção (Óleo e LGN)



Fonte: PETROBRAS, 2013

Para manter essas unidades em funcionamento, uma complexa operação de suprimentos se faz necessária. Cerca de 54% da carga de barcos fornecedores para os campos operados pela Petrobras foi transportada a partir do porto de Imbetida, em Macaé-RJ (LEITE, 2012). O planejamento em nível tático da programação dos berços passa a ser uma atividade fundamental para a garantia do nível de serviço adequado e robustez das atividades *offshore*.

Toda essa movimentação da indústria do petróleo bem como a exportação de *commodities* reflete a expansão das atividades portuárias que se deu nos últimos anos no Brasil. A movimentação portuária de cargas nacional apresentou entre os anos de 2000 e 2011, uma média anual de crescimento próxima a 6%. Entre 2010 e 2011, o crescimento na movimentação alcançou 6,25% e ratificou a média dos anos anteriores. O resultado foi um total de 886 milhões de toneladas de cargas movimentadas em 2011 contra 834 milhões de toneladas em 2010, confirmando assim a tendência de crescimento (ABPT, 2011).

A exploração dos terminais portuários pode ocorrer de três formas: diretamente pela União, Estados ou Municípios; por terceiros mediante arrendamento; ou por meio de autorização do Ministério competente. Conforme sua localização, dentro ou fora da área do porto organizado, o terminal pode ser classificado em público ou privado. Da mesma forma, o operador também pode ser um agente público ou privado e quanto à

utilização do terminal, somente para carga própria ou incluindo carga de terceiros (BASTOS, 2013). Como será apontado na revisão de literatura, os trabalhos relacionados a programação de berços portuários são majoritariamente sobre a administração de portos que movimentam carga de terceiros. Por se tratar de um porto privado para movimentação de carga própria, existem no problema estudado um conjunto de restrições operacionais e indicadores de desempenho que não são levados em conta nos demais trabalhos sobre o mesmo tema.

## **1.2 Objetivos**

Em vista da grande complexidade das decisões que são necessárias para o bom planejamento de operações portuárias, a elaboração de modelos e metodologias de apoio a decisão são de extrema relevância. A Pesquisa Operacional pode prover ferramentas poderosas para que um indivíduo tome as melhores decisões em um determinado empreendimento. Tomar decisões é algo complexo e administrar sua complexidade é o desafio de todo dirigente moderno (BISPO, 1998).

O objetivo deste trabalho é propor formulações de programação inteira mista para a escolha de uma programação portuária para operações suprimento offshore. Isso consiste na definição dos melhores horários de atracação dos barcos que realizarão as respectivas rotas de suprimento. Para tanto, devem ser levadas em conta as restrições de precedência entre as atracações, de espaçamento mínimo e máximo de tempo entre rotas que possuem algum tipo de relação e de compatibilidade entre os berços portuários e as operações de carga/descarga.

## **1.3 Estrutura**

Esta dissertação se divide em seis capítulos. Primeiramente, tem-se a introdução, com uma apresentação geral do problema e seu contexto. Em seguida, são apresentadas



as justificativas e motivações para a realização deste trabalho, bem como os objetivos gerais e específicos propostos.

No segundo capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica, com trabalhos já publicados que lidem com objetos semelhantes, ou que forneçam ferramentas e metodologias úteis para este estudo.

O capítulo três apresenta a descrição completa da variante do Problema De Alocação de Berços estudada neste trabalho. Serão listadas as principais restrições que devem ser englobadas pelo modelo, bem como premissas e simplificações necessárias para seu tratamento. Em seguida, o capítulo mostra as formulações propostas. Sendo as primeiras formulações mais simplificadas por questões de desempenho e, por fim a última formulação aquela que modela o problema real de forma mais verossímil.

No capítulo quatro será discutida a metodologia de experimentação dos modelos, a implementação e instâncias de testes. Adiante, o mesmo capítulo contém a discussão crítica dos resultados obtidos com a implementação, tanto do ponto de vista computacional quanto em termos práticos para uma operação portuária realista.

A conclusão é apresentada no capítulo cinco, com a síntese do que foi desenvolvido e alcançado, além de propostas para futuras continuações deste trabalho. No capítulo seis, em seguida, são listadas as referências bibliográficas.

## 2 Revisão Bibliográfica

O planejamento de portos e berços portuários se relaciona com diversos problemas de órbita operacional, tática e estratégica. No ambiente da exploração e produção de petróleo o nível de serviço atingido pelas operações de suprimento é de extrema relevância, principalmente nas operações *offshore*. O planejamento adequado das embarcações supridoras tanto sob a ótica de roteamento quanto sequenciamento impacta os custos operacionais e a confiabilidade das operações como um todo.

A literatura sobre o tema é bastante variada em termos gerais. Entretanto com relação ao planejamento de portos o que se verificou foi a predominância de trabalhos sobre planejamento e alocação de berços em portos multiusuário com objetivo de minimizar tempo de espera para atracações. Trabalhos relacionados à indústria do petróleo e gás em geral se concentram na elaboração de rotas de suprimento. O sequenciamento das rotas poucas vezes leva em consideração a capacidade do terminal portuário.

### 2.1 Logística *offshore*

O trabalho apresentado consiste no estudo de otimização de planejamento para uma das etapas da logística *upstream*. Em termos de logística, a produção de petróleo e gás é dividida em duas partes: logística *upstream* e *downstream*. As atividades destinadas para trazer petróleo e gás e seus derivados até os consumidores finais são conhecidas como logística *downstream*, enquanto o conjunto de atividades destinadas para o abastecimento das instalações offshore com suprimentos necessários é nomeado logística *upstream* (AAS et al., 2007).

Halvorsen-Weare e Fagerholt (2011) apontam a dificuldade da execução da programação planejada de embarcações supridoras por conta de imprevisibilidades, muitas das quais são derivadas de atrasos por conta de condições climáticas e propõem um modelo de programação robusta para programação de barcos de suprimento.

Uglane e Friedberg (2012) trabalharam o problema de roteamento e sequenciamento de suprimentos (PSV). Seu modelo por ser focado também no problema de roteamento peca por tentar ser muito geral, o que torna impraticável resolver instâncias de tamanho real. Além disso, trabalhar o roteamento junto com a programação do porto implica em uma necessidade de grande flexibilidade operacional, pois sempre que ocorrer alguma movimentação de sondas ou mudança do perfil de demanda (que é bastante frequente) as unidades terminam por perder a previsibilidade das entregas.

Ainda no plano dos problemas de sequenciamento, Costa (2005), apresenta uma formulação baseada em discretização do tempo para o problema de itinerário de sondas. Essa formulação, embora tenha uma boa relaxação exige muitos recursos computacionais por conta da grande quantidade de restrições geradas ainda para instâncias muito pequenas o que leva o autor a trabalhar soluções a partir de heurísticas e da metaheurística GRASP. Duhamel et al. (2012) trabalharam com formulações baseadas em sequenciamento e roteamento de veículos e métodos híbridos de heurísticas com geração de colunas para o problema de manutenção de poços. Mattos Ribeiro et al. (2012) apresentaram um método muito eficiente de *branch-price-and-cut* para o mesmo problema de sequenciamento de sondas.

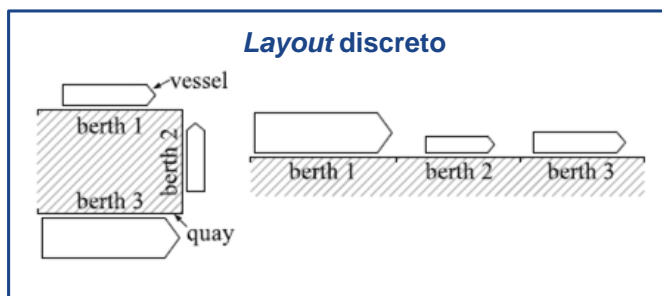
## 2.2 Programação de Berços

O problema de programação de berços (BAP) refere-se à atribuição de uma embarcação específica para um local físico dentro do porto para realização dos processos de carregamento/descarregamento. No BAP é dado o layout do píer de um terminal de contêineres, juntamente com um conjunto de embarcações que têm de ser servidas dentro do horizonte de planejamento. Para cada navio, dados adicionais como comprimento da embarcação, o seu calado, a hora prevista de chegada, e o tempo esperado de carregamento, podem ser considerados (BIERWIRTH; MEISEL, 2010). O planejamento de berços foi demonstrado ser um problema *-hard* ao ser relacionado ao problema de partição de conjuntos (LIM, 1998) e com o problema de corte bidimensional (IMAI et al., 2005).

Podem haver diversas restrições envolvidas na alocação de berços, o que leva a uma grande variedade de formulações para o BAP (BIERWIRTH; MEISEL, 2010). Imai et al (2005) apresentam três classes para o problema sob a ótica do tipo de layout dos berços. São elas (Figura 2.1, Figura 2.2, Figura 2.3):

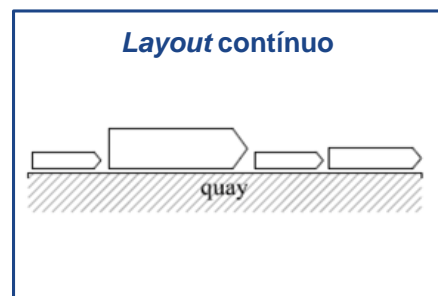
- a) *Layout* discreto: O píer é particionado em seções (berços). Apenas uma embarcação pode ser servida em um berço por vez.
- b) *Layout* contínuo: Não há particionamento do píer. Embora isso permita uma maior utilização do espaço disponível no porto, o planejamento das atracações se torna muito mais complexo.
- c) *Layout* híbrido: Assim como no caso discreto, o píer é dividido em berços. Desta vez é permitido que embarcações maiores ocupem mais de um berço, bem como as menores podem compartilhar o espaço do mesmo berço.

Figura 2.1: Arranjo discreto



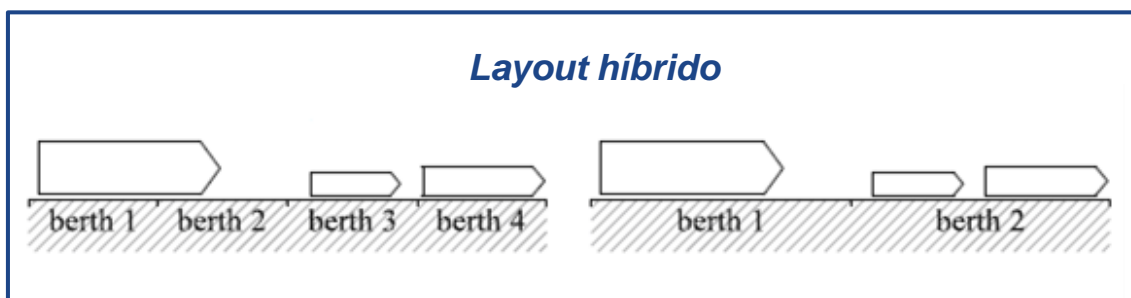
Fonte: Adaptado de BIERWIRTH & MEISEL, 2010, p 617

Figura 2.2: Arranjo contínuo



Fonte: *Idem*

Figura 2.3: Arranjo híbrido



Fonte: *Idem*

Imai *et al.* (2003) consideram o problema de alocação dinâmica de berços em que as embarcações têm diferentes prioridades de serviço. A abordagem começa a partir

da construção de um modelo de programação inteira com variável binária de decisão que é 1 se o barco  $j$  é o  $k$ -ésimo a ser processado no berço  $i$ . Esse modelo é resolvido por meio do método de subgradiente com relaxação Lagrangeana como também foi proposto por Nishimura et al. (2001). O modelo relaxado cai em um problema quadrático de alocação que, por sua dificuldade em ser resolvido por meio de algoritmos exatos, fez com que os autores optassem pela implementação de uma heurística baseada em algoritmos genéticos. Robenek et al. (2014) resolvem o problema para cargas granéis através de um algoritmo de *branch-and-price* e uma combinação com metaheurísticas para resolver problemas de grande porte. Umang et al. (2014) se utilizam de uma formulação de partição de conjuntos com heurísticas *squeaky wheel optimization*<sup>3</sup> para construção e aprimoramento de soluções viáveis.

Cordeau et al. (2005) comparam o desempenho de formulações e heurísticas de Busca Tabu para minimizar o tempo de espera das embarcações tanto para o caso discreto quanto contínuo. Uma heurística híbrida do método Busca por Clusterização com geração de soluções por *Simulated Annealing* é implementado por Oliveira et al, (2012). Algoritmos genéticos são utilizado para resolver o BAP em Nishimura et al. (2001), Imai et al. (2003) e Imai et al. (2013). Cheong et al. (2008) utilizam algoritmos genéticos para resolver um problema multiobjetivo.

Outra variante do BAP é apresentada por Xu et al. (2012) que considera a designação de berços limitada por calado e condições de maré. O objetivo é minimizar o tempo de espera das embarcações ponderado pelo seu custo. Para resolver este problema são comparadas uma formulação baseada em modelos de sequenciamento de tarefas em máquinas paralelas e um método heurístico formulado pelos autores. Uma formulação de fluxo em redes espaço-tempo também pode ser utilizado para trabalhar com o BAP (YAN et al., 2015).

A literatura sobre problemas de otimização estocástica de alocação de berços ainda é escassa e incipiente. Diversas aleatoriedades estão presentes ao lidar com operações portuárias. Dentre elas, destacamos: entrega de fornecedores no prazo;

---

<sup>3</sup> A heurística *squeaky wheel optimization* consiste na utilização de um algoritmo guloso para construir uma solução que é então analisada para encontrar elementos, que, se melhorados, provavelmente irão aprimorar a função objetivo. O resultado da análise gera prioridades de direcionamento para o algoritmo guloso em busca de uma nova solução. Essa sequência de procedimentos é repetida até que uma solução aceitável seja encontrada ou algum outro critério de parada tenha sido atingido (JOSLIN; CLEMENTS, 1999).

indisponibilidade de recursos (berços, guindastes entre outros); tempo de carregamento. Karafa *et al.*(2012) lidam com um modelo de alocação de berços com tempos de carregamento estocásticos. Sua métrica consiste num modelo bi-objetivo para minimizar o tempo de serviço total esperado para os barcos e o risco de atrasos em relação ao que foi programado.

Outra forma de lidar com a estocasticidade no BAP pode ser através de um modelo de otimização com restrições probabilísticas. Pengfei *et al.* (2006) consideram como variáveis aleatórias o tempo de chegada ao porto e o tempo de carregamento de cada embarcação com a introdução de restrições probabilísticas. Esse mesmo grupo de variáveis aleatórias foi considerado por Golias *et al.* (2014) em um modelo de programação robusta

Os trabalhos apresentados nos parágrafos anteriores dão embasamento para afirmar que o problema de alocação de berços além de sua comprovada natureza - *hard*, possui várias formas de abordagem que podem dificultar ainda mais sua resolução. O problema estudado nessa dissertação difere de todos os apresentados por se tratar de um terminal dedicado. Nesse sentido não faz sentido avaliar o atraso máximo das embarcações ou tempo de espera médio até o começo do carregamento.

O ponto comum de algumas das publicações com este trabalho é trabalhar o caso de *layout* discreto com modelos de programação inteira (CHEONG et al., 2008; IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2003; NISHIMURA; IMAI; PAPADIMITRIOU, 2001; XU; LI; LEUNG, 2012). Outros trabalhos se assemelham por lidarem com problemas de sequenciamento, como no caso do problema de sequenciamento de sondas (COSTA, 2005; DUHAMEL; CYNTHIA SANTOS; MOREIRA GUEDES, 2012; MATTOS RIBEIRO; DESAULNIERS; DESROSIERS, 2012).

Apesar de alguns trabalhos tentarem resolver o BAP com métodos exatos de otimização, nenhum deles trabalhou um problema com o nível de generalidade que esta dissertação irá apresentar. Não há trabalhos dentre os listados que tenham flexibilizado os modelos para garantir atracções em horários fixos, ou em turnos nos portos. Outro ponto é a periodicidade da programação. Além disso, nenhum trabalho considera a periodicidade das atracções, devendo todas elas, em geral, terminar antes do fim do horizonte de planejamento. Se lidarmos com um planejamento de uma semana e com

hora zero na meia noite de segunda, por exemplo, não é possível programar uma atracção para começar no domingo e terminar na segunda da próxima semana.

Desta forma, podemos resumir as variadas publicações envolvendo o problema de alocação de berços (BAP) e alguns problemas de sequenciamento semelhantes em dois grupos: Modelos Determinísticos; e Modelos Estocásticos. Os Modelos Determinísticos podem ainda ser divididos em Métodos Heurísticos e Híbrido ou exatos, de acordo com o tipo de algoritmos utilizados para resolver o problema de otimização (Tabela 2.1).

	<b>Métodos Heurísticos e Híbridos</b>	<b>Métodos Exatos</b>
<b>Modelos Determinísticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Busca Tabu               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (CORDEAU et al., 2005)</li> </ul> </li> <li>• <i>Squeaky Wheel Optimization</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (UMANG; BIERLAIRE; VACCA, 2013)</li> </ul> </li> <li>• <i>Simulated Annealing &amp; Clusterização</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (DE OLIVEIRA; MAURI; NOGUEIRA LORENA, 2012)</li> </ul> </li> <li>• Algoritmos Genéticos               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (NISHIMURA; IMAI; PAPADIMITRIOU, 2001)</li> <li>○ (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2003)</li> <li>○ (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2013)</li> <li>○ (CHEONG et al., 2008)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Branch-and-Bound</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (YAN et al., 2015)</li> <li>○ (XU; LI; LEUNG, 2012)</li> </ul> </li> <li>• Subgradiente               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (NISHIMURA; IMAI; PAPADIMITRIOU, 2001)</li> <li>○ (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2003)</li> </ul> </li> <li>• Geração de colunas               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (DUHAMEL; CYNTHIA SANTOS; MOREIRA GUEDES, 2012)</li> </ul> </li> <li>• <i>Branch-And-Price</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (ROBENEK et al., 2014)</li> </ul> </li> </ul>
<b>Modelos Estocásticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimização De Risco               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (KARAFI et al., 2012)</li> </ul> </li> <li>• Restrição Probabilística               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (PENGFEI; HAIGUI; LI, 2006)</li> </ul> </li> <li>• Otimização Robusta               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ (GOLIAS et al., 2014)</li> </ul> </li> </ul>	

Tabela 2.1: Tabela sinótica da principal bibliografia sobre programação de berços portuários.

### 3 Definição do Problema e Formulações

Num problema de alocação de berços as principais decisões que são tomadas dizem respeito à escolha dos berços nos quais as embarcações ficarão atracadas e ao instante de tempo em que essa atracação será iniciada. No caso do porto de Imbetiba, o *layout* dos berços se caracteriza como um arranjo do tipo discreto. A relação entre barco atracado e berço é biunívoca, ou seja, apenas um barco pode atracar em um berço por vez. Delimitado esse primeiro marco de classificação do problema com relação a geometria da alocação, os próximos parágrafos entrarão nos detalhes mais operacionais.

#### *Tipos de Unidades*

As diversas unidades marítimas atendidas por um porto possuem demandas que variam entre cargas gerais, fluidos, diesel, rancho, entre outras. Existe uma grande diferença operacional entre as unidades marítimas. De modo simplificado elas podem ser classificadas segundo seu uso em dois grandes grupos: unidades estacionárias de produção (UEPs) e sondas. As UEPs são utilizadas para a produção de petróleo enquanto as sondas são utilizadas para a construção de poços. Em função desta utilização as UEPs têm posicionamento fixo e possuem uma demanda com menor variabilidades. Por outro lado, as sondas possuem grande demanda por tubos, equipamentos, chamadas emergenciais com maior frequência, além de mudarem de posição ao longo do tempo.

#### *Clusters*

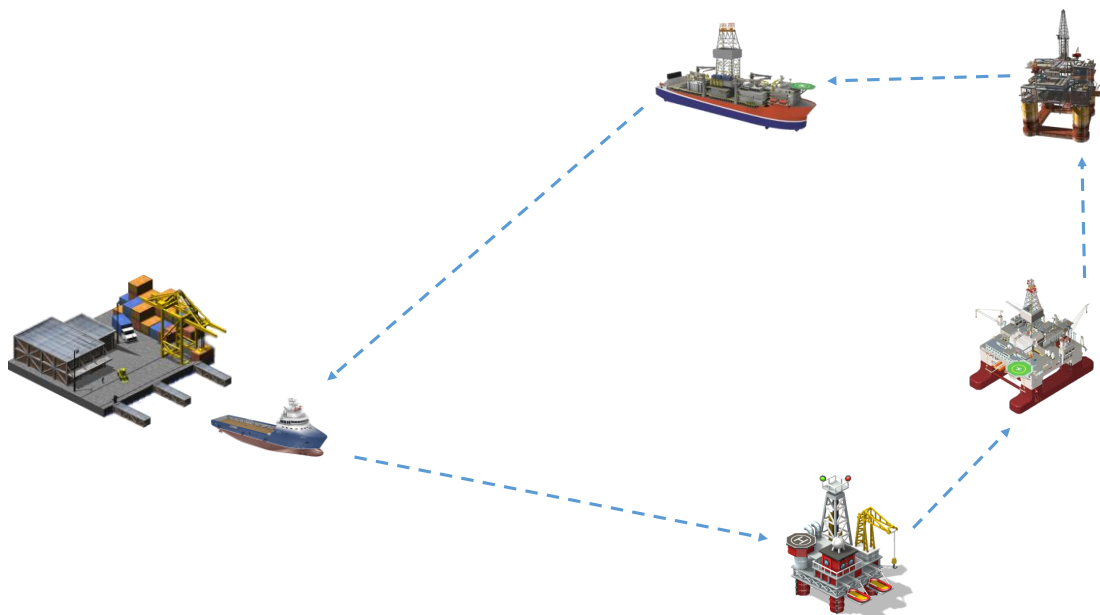
As unidades marítimas são agrupadas, em seguida, na forma de *clusters* (Figura 3.1) de acordo com seu perfil de demanda e proximidade. Cada *cluster* terá uma frequência de atendimentos semanais em função do seu perfil de demanda. No caso estudado, a frequência de atendimento de um *cluster* de UEPs será duas vezes na semana e a de um *cluster* de Sondas será de três viagens semanais.



### *Espaçamento entre atendimentos*

É importante que as viagens de um mesmo *cluster* tenham espaçamento uniforme ao longo da semana. Não faria sentido algum sair uma nova viagem de atendimento para o mesmo grupo de unidades poucas horas depois de uma viagem anterior. Desta forma, *clusters* com dois atendimentos semanais devem ter um espaçamento de aproximadamente 84 horas, os de frequência três aproximadamente 56 horas e assim sucessivamente. Diversas atividades da unidade são afetadas se não houver previsibilidade na chegada das embarcações. Operações com barco e guindaste não podem acontecer junto de pouso e decolagem de helicópteros ou de operação de mergulho, além de outros procedimentos de segurança. Essa alocação uniforme das viagens ao longo da semana proporciona maior estabilidade e previsibilidade para as operações das unidades e um controle mais seguro dos estoques.

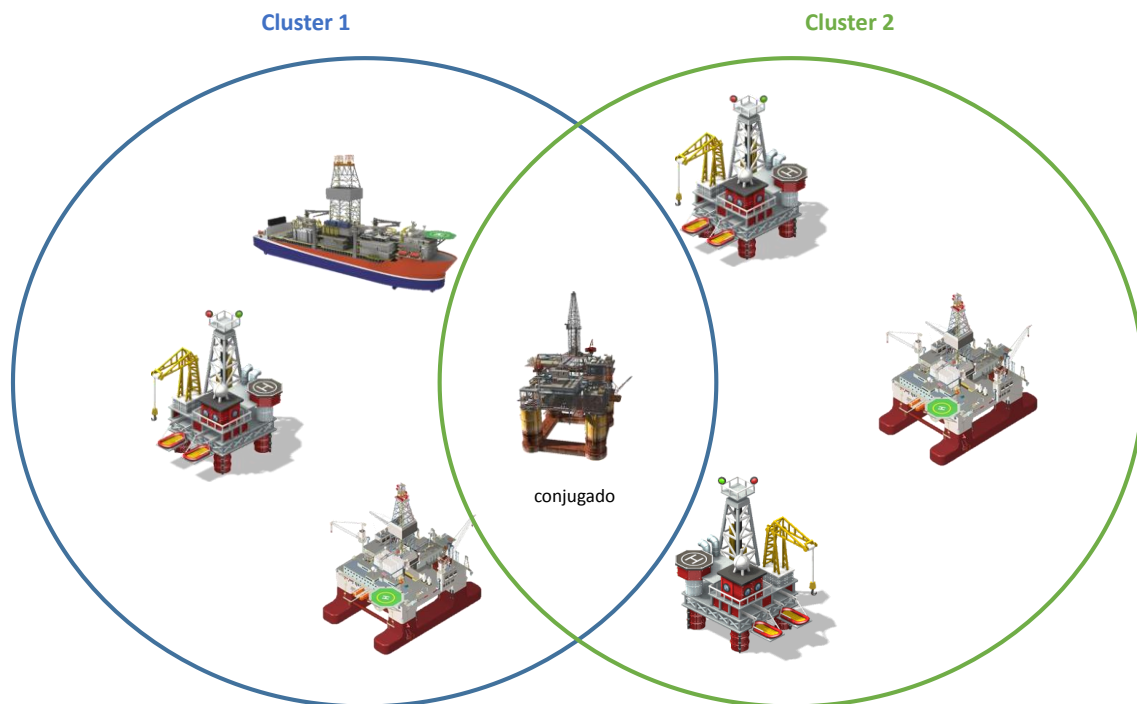
Figura 3.1: Representação de um *cluster*



Algumas unidades necessitam de mais atendimentos por semana, mas não são numerosas ou próximas o bastante para a formação de um novo *cluster* com frequência

maior. Para resolver esse problema alguns grupos são associados na forma de conjugados (Figura 3.2). Os clusters conjugados compartilham pelo menos uma unidade em comum. Tendo cada um dos conjugados frequência de atendimento igual a dois, as unidades em comum passam a ter quatro atendimentos por semana. Os conjugados, assim como as viagens, devem ter um espaçamento adequado ao longo da semana, pois caso as atracções sejam muito próximas irão prejudicar as operações das unidades compartilhadas. Para esta operação o tempo ideal é fixado em 42 horas.

Figura 3.2: Representação de *clusters* conjugados



### ***Folga de Tolerância***

Outro ponto relevante com relação aos intervalos de tempo entre os atendimentos é a folga de tolerância. É possível que se encontre uma solução viável para o problema em que os espaçamentos são exatamente os considerados ideais, tanto para viagens múltiplas, quanto para clusters conjugados. Essa restrição, porém, pode dificultar em muito a descoberta de soluções, ou pode, literalmente, inviabilizar o problema. Desta forma é aceitável tolerar algum desvio em relação ao intervalo

considerado ideal. É difícil determinar com precisão o quanto serial o valor tolerável. Em alguns casos pode ser possível que o valor fixado também não seja capaz de admitir solução viável.

Inicialmente foi escolhido trabalhar com uma folga de tolerância – o que se mostrou inadequado para o problema. A forma escolhida para trabalhar com essa restrição foi seu relaxamento pela adição de variáveis de folga com penalização na função objetivo. Isso possibilita fornecer direções dentro do espaço de soluções onde se possa aprimorar a solução de forma qualitativa. Por outro lado, acaba por gerar uma dificuldade em definir qual a melhor função objetivo para o problema.

### ***Compatibilidade de Berços***

Existem tipos de demanda que não são compatíveis com determinados berços. Por questões de segurança e meio ambiente, operações que envolvam carga e descarga de diesel ou outros fluidos não devem ocorrer próximas à praia, alguns berços não suportam o peso da carga que será movimentada, ou simplesmente não possuem os equipamentos mais adequados. Além disso deve ser respeitado um espaçamento mínimo de tempo entre as atracções. Esse espaçamento inclui uma margem de erro para os casos em quem a atracção demora mais tempo do que o que estava planejado e uma folga de segurança para que as embarcações possam manobrar para entrar e sair dos berços.

### ***Incertezas***

Por fim existe a imprevisibilidade do tempo real de atracção. O tempo gasto para carga e descarga da embarcação é proporcional ao volume de demanda que ela irá transportar. Cada movimentação de carga com o guindaste consome um tempo que possui uma distribuição de probabilidades. A demanda, por sua vez, também possui uma aleatoriedade em função das operações que são desempenhadas na unidade, época do ano, entre outros fatores. Uma programação robusta deve levar em conta essas aleatoriedades para manter a previsibilidade da entrega para as unidades. Atualmente os tempos de atracção são estimados pela média adicionada de uma margem de tempo,



## 3.1 Formulações do Problema

Neste capítulo são apresentadas as formulações propostas para resolver o problema. Os modelos matemáticos estudados podem ser divididos em dois grupos principais. Formulações com variáveis de ordenação e com variáveis de sequenciamento. Cada tipo de formulação apresenta características que diferenciam os modelos tanto na forma de implementação quanto na eficiência para otimização. As características gerais serão apresentadas, juntamente com a formulação nos próximos tópicos deste mesmo capítulo.

### 3.1.1 Formulações com variáveis de ordenação

As formulações com variáveis de ordenação se caracterizam pela existência de uma variável binária  $x_{ij}$  que será 1 se a atracação  $j$  for a  $k$ -ésima atracação realizada no berço  $i$ . Esse tipo de formulação tem uma vantagem por ser mais imediata a interpretação do resultado fornecido pela otimização. Com uma única binária é possível saber quase todas as informações relevantes da programação.

#### 3.1.1.1 Modelo de ordenação com parâmetro de tolerância

A primeira abordagem do problema se baseou na formulação de sequenciamento para o problema de manutenção de poços proposta por Duhamel et al. (2012). A caracterização do modelo segue abaixo com a descrição dos conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão e sua estruturação em função objetivo e restrições. Essa formulação, baseado num modelo de sequenciamento, pressupõe que existe um parâmetro fixo  $\Delta$  que delimita a diferença máxima do intervalo ideal para atracações consecutivas ou conjugadas.

### Conjuntos e índices:

Berços;  
Atracações;  
Ordens;  
Conjugados;

### Parâmetros:

$d_j$  tempo para processar atracação  $j$  no porto;  
 $L_{prec}$  intervalo de tempo ideal entre atracações de um mesmo *cluster*;  
 $L_{conj,j,r}$  intervalo de tempo ideal entre atracações conjugadas;  
 $\Delta$  margem de aceitação do tempo ideal entre atracações conjugadas e entre viagens;  
 $Bincomp_{i,j}$  binário que indica se berço  $i$  é incompatível com rota  $j$ ;  
 $prec_{j,r}$  binário que indica se rota  $j$  precede rota  $r$ ;  
 $Tmax$  tempo máximo para programação dos berços;

### Variáveis de decisão:

binária, igual a 1 se a atracação  $j$  é a  $k$ -ésima a ser processada no berço  $i$ ;  
tempo em que a atracação  $j$  começa a ser processada;  
binária, igual a 1 se a atracação  $j$  é a primeira a ser processada no conjugado  $(j,r)$ ;  
tempo em que a última atracação termina de ser processada;

(3.1)

s.a.

(3.2)

(3.3)

(3.4)

(3.5)

(3.6)

(3.7)

(3.8)

- (3.9)
- (3.10)
- (3.11)
- (3.12)
- (3.13)
- (3.14)
- (3.15)
- (3.16)
- (3.17)

A função objetivo (3.1) procura minimizar o máximo tempo de término das atracções no porto. A restrição (3.2) garante que cada rota será processada em 1 berço. A equação (3.3) assegura que cada berço atenderá no máximo uma rota para cada posição dentro do sequenciamento. As desigualdades (3.4) especificam que as rotas são alocadas de forma consecutiva nos berços. As restrições (3.5) determinam o início do serviço no berço, que depende da rota que foi processada anteriormente. Na equação (3.6) ficam impedidas as rotas incompatíveis com determinados berços de serem processadas neles.

As restrições (3.7) - (3.8) determinam os limites inferior e superior de tempo para uma rota  $r$ , precedida por  $j$  começar. E (3.9) - (3.12) determinam os limites inferior e superior de tempo para *clusters* conjugados. A restrição (3.13) é a linearização da função objetivo . As restrições (3.14) - (3.17) fixam: o valor máximo de  $t_r$ ,  $t_{r,j}$  e  $t_{r,j}$  como binárias e  $t_r$  como número real respectivamente.

O primeiro modelo implementado se mostrou inadequado para tratar o problema real. Ocorre que ao levar todas as restrições de uma boa programação para os dados reais o modelo não é viável. A principal dificuldade com relação a viabilidade do problema real diz respeito às restrições de tempo. Uma vez que o principal gargalo da programação é a capacidade dos berços, pode ser impossível alocar todas as atracções de forma a respeitar os intervalos mínimos necessários entre viagens de um mesmo *cluster*, a distância entre os conjugados e ainda aqueles que possuem horários fixos de saída. Mesmo a atribuição de uma margem de tolerância a abordagem não é robusta o suficiente para caminhar em direção a uma solução viável.

### 3.1.1.2 Modelo baseado de ordenação relaxado

Uma vez constatado que não é possível encontrar uma programação que satisfaça todas as restrições impostas, procurou-se desenvolver uma nova formulação com capacidade de aceitar um espaço maior de soluções e caminhar em direção da solução que seja o mais próximo de uma programação ideal. Sendo assim o segundo modelo proposto é como segue:

#### Conjuntos e índices:

Berços;  
Rotas;  
Ordens;  
Conjugados;

#### Parâmetros:

$d_j$  tempo para processar atracação  $j$  no porto;  
 $L_{prec}$  intervalo de tempo ideal entre viagens de uma mesma atracação;  
 $L_{conj},r$  intervalo de tempo ideal entre atracação conjugadas;  
 $Bincomp_{i,j}$  binário que indica se berço  $i$  é incompatível com atracação  $j$ ;  
 $prec_{j,r}$  binário que indica se atracação  $j$  precede rota  $r$ ;  
 $Tmax$  tempo máximo para programação dos berços;

#### Variáveis de decisão:

binária, igual a 1 se a atracação  $j$  é a  $k$ -ésima a ser processada no berço  $i$ ;  
tempo em que a atracação  $j$  começa a ser processada;  
sobra de tempo positiva e negativa em relação ao ideal entre viagens;  
sobra de tempo positiva e negativa em relação ao ideal entre conjugados;

(3.18)

s.a.



(3.19)

(3.20)

(3.21)

(3.22)

(3.23)

(3.24)

(3.25)

(3.26)

(3.27)

(3.28)

(3.29)

A principal diferença em relação ao modelo anterior está na adoção das variáveis  $\alpha$ ,  $\beta$ , e  $\gamma$ . Ao abrir mão do objetivo de minimizar o *makespan* em troca de minimizar as diferenças totais entre o intervalo de tempo ideal entre *clusters* e o intervalo da solução se tornou possível explorar soluções que antes eram consideradas inviáveis e se aproximar de uma programação que fosse a mais próxima possível daquilo que se considera adequado para as operações de suprimento.

A função objetivo (3.18) procura minimizar a soma dos desvios em relação ao espaçamento ideal para atracções. A restrição (3.19) garante que cada atracção será alocada em apenas um berço. A equação (3.20) assegura que cada berço atenderá no máximo uma rota para cada posição dentro do sequenciamento. As desigualdades (3.21) especificam que as rotas são alocadas de forma consecutiva nos berços. As restrições (3.22) determinam o início do serviço no berço, que depende da rota que foi processada anteriormente. Na equação (3.23) ficam impedidas as rotas incompatíveis com determinados berços de serem processadas neles. As restrições (3.24) e (3.25) calculam as folgas positivas ou negativas dos espaçamentos entre atracções consecutivas e *clusters* conjugados respectivamente. As restrições (3.27) - (3.29) fixam: o valor máximo de  $\alpha$ ,  $\beta$  como binárias e  $\gamma$ ,  $\delta$ , e  $\epsilon$  como reais não negativas.

Essa formulação é mais flexível, porém o modelo ainda é custoso do ponto de vista computacional. O gap da solução permanece elevado mesmo depois de muitas horas de processamento (acima de 60%). Se por um lado o problema não exige rapidez para a produção de uma solução, por outro, essa demora acaba por dificultar análises que poderiam ser feitas para validar vantagens e desvantagens de diferentes conjuntos de programação.

Para efeito de teste foi preparada uma solução de uma instância real com 61 atracções para serem programadas. O modelo foi processado durante 1 hora e 10 minutos. O maior desvio encontrado foi de 28 horas contra 23 da programação utilizada, mas a média dos desvios foi bem menor (3,42 contra 5,6). Outras variantes de função objetivo poderiam ser utilizadas como minimizar o maior desvio de tempo.

Embora essa formulação ainda não tenha sido descartada, também foram testadas outras alternativas que pudessem vencer os principais pontos fracos do modelo baseado na formulação de Duhamel et al (2012). Um dos pontos negativos que se destaca é o grande número de restrições. Isso torna a matriz do problema de programação linear muito grande e dificulta seu tempo de processamento. Um modelo menor poderia trazer ganhos de performance e com consequência uma flexibilidade de uso maior para o modelo no planejamento das atracções.

### **3.1.1.3 Modelo de ordenação com variáveis de espaçamento**

O terceiro modelo proposto de baseia no artigo de Imai et al (2003). Nessa formulação é adicionada a variável  $t_i$  que significa o tempo ocioso do berço  $i$  entre a atracção  $k-1$  e a atracção de  $j$  na posição  $k$ . Com a adição desta variável é possível substituir a restrição (3.5) pelas restrições  $t_i \geq 0$  que permitem modelar o problema com um conjunto muito menor de desigualdades.

#### **Conjuntos e índices:**

Berços;  
Atracções;  
Ordens;

Conjugados;

**Parâmetros:**

$d_j$	tempo para processar rota $j$ no porto;
$L_{prec}$	intervalo de tempo ideal entre viagens de uma mesma rota;
$L_{conj,j,r}$	intervalo de tempo ideal entre rotas conjugadas;
$Bincomp_{i,j}$	binário que indica se berço $i$ é incompatível com rota $j$ ;
$prec_{j,r}$	binário que indica se rota $j$ precede rota $r$ ;
$Tmax$	tempo máximo para programação dos berços;

**Variáveis de decisão:**

binária, igual a 1 se a rota  $j$  é a  $k$ -ésima a ser processada no berço  $i$ ;  
tempo em que a atracação  $j$  começa a ser processada;  
tempo ocioso do berço  $i$  entre a atracação  $k-1$  e a atracação de  $j$  na posição  $k$ ;  
sobra de tempo em relação ao ideal entre viagens;  
sobra de tempo em relação ao ideal entre conjugados;

(3.30)

s.a.

(3.31)

(3.32)

(3.33)

(3.34)

(3.35)

(3.36)

(3.37)

(3.38)

(3.39)

(3.40)

(3.41)

(3.42)

A função objetivo (3.30) procura minimizar a soma dos desvios em relação ao ideal para as atracções no porto. A restrição (3.31) garante que cada rota será processada em um berço. A equação (3.32) assegura que cada berço atenderá no máximo uma rota para cada posição dentro do sequenciamento. As desigualdades (3.33) especificam que as rotas são alocadas de forma consecutiva nos berços. As restrições (3.34) e (3.35) determinam o início do serviço no berço, que depende das rotas que foram processada anteriormente. Na equação (3.36) ficam impedidas as rotas incompatíveis com determinados berços de serem processadas neles. Nas equações (3.37) - (3.40) são garantidos os intervalos entre viagens, os intervalos entre conjugados e o tempo máximo para iniciar uma atracção.

Esse modelo embora tenha menos restrições, se mostrou muito mais lento que o anterior. Foram necessárias mais de duas horas para encontrar a primeira solução viável para o caso com 61 atracções e mesmo assim o gap continuou elevado depois de mais duas horas.

### **3.1.2 Formulações com variáveis de sequenciamento**

As formulações com variáveis de sequenciamento se baseiam na variável binária  $x_{ij}$ , que será 1 se as atracções  $r$  e  $j$  acontecem no berço  $i$  e  $r$  precede  $j$ . Esse tipo de modelagem gera um modelo mais compacto, com menos restrições, porém menos intuitivo para se construir as restrições.

#### **3.1.2.1 Modelo com variáveis de sequenciamento inicial**

Xu et al. (2011) trabalham o problema de alocação de berços com restrições de calado e condições de marés. O problema consiste na definição dos horários de

atracação levando em conta que em determinadas faixas de tempo os barcos ficam incompatíveis com os berços por conta da variação da maré. O objetivo do modelo é minimizar os tempos de espera dos barcos ponderados pelos seus custos.

A formulação é derivada do problema de sequenciamento de tarefas em máquinas paralelas e utiliza como variáveis de decisão a alocação de um barco  $j$  antes de um barco  $r$  no mesmo berço  $i$ . Segue abaixo a descrição do modelo:

**Conjuntos e índices:**

- Berços;
- Rotas;
- Conjugados;

**Parâmetros:**

- $d_j$  tempo para processar rota  $j$  no porto;
- $L_{prec}$  intervalo de tempo ideal entre viagens de uma mesma rota;
- $L_{conj,j,r}$  intervalo de tempo ideal entre rotas conjugadas;
- $Bincomp_{i,j}$  binário que indica se berço  $i$  é incompatível com rota  $j$ ;
- $prec_{j,r}$  binário que indica se rota  $j$  precede rota  $r$ ;
- $T_{max}$  tempo máximo para programação dos berços;

**Variáveis de decisão:**

- binária, igual a 1 se a rota  $j$  é alocada antes da rota  $r$  no berço  $i$ ;
- binária, igual a 1 se a rota  $j$  é alocada no berço  $i$ ;
- tempo de início de  $j$ ;
- sobra de tempo em relação ao ideal entre viagens;
- sobra de tempo em relação ao ideal entre conjugados;

(3.43)

s.a.

(3.44)

(3.45)

– (3.46)

(3.47)

(3.48)

(3.49)

(3.50)

(3.51)

(3.52)

(3.53)

(3.54)

A função objetivo (3.43) procura minimizar a soma dos desvios em relação ao ideal para as atracções no porto. A restrição (3.44) garante que cada rota será processada em 1 berço. A equação (3.45) assegura que se as rotas  $j$  e  $r$  são designadas ao berço  $i$ , e  $j$  é processada antes de  $r$ , então o tempo de início de  $j$  somado de sua duração deve ser inferior ao início de  $r$ . As desigualdades (3.46) e (3.47) garantem que uma das variáveis  $x_{ij}$  e  $x_{ir}$  será igual a 1 se  $j$  e  $r$  são designados ao berço  $i$  e assegura também, que ambas as variáveis serão 0 se  $j$  ou  $r$  não forem designadas a  $i$ . Na equação (3.48) ficam impedidas as rotas incompatíveis com determinados berços de serem processadas neles. Nas equações (3.49) - (3.51) são garantidos os intervalos entre viagens, os intervalos entre conjugados e o tempo máximo para iniciar uma atracção.

Essa formulação se mostrou mais eficiente do que as anteriores. Em intervalos de tempo inferiores a 2000 segundos (meia hora) foi possível encontrar soluções com gap inferior ao dos modelos anteriores.

### **3.1.2.2 Modelo baseado com variáveis de sequenciamento revisado**

As formulações apresentadas até então não modelam completamente todas as restrições operacionais para o problema estudado. Algumas restrições não vinham sendo consideradas tanto do ponto de vista de viabilidade quanto do ponto de vista de tempo de execução. Diante do melhor desempenho obtido pela formulação 3.1.2.1, esta foi escolhida para dar continuidade na implementação de uma formulação capaz de se aproximar ainda mais da necessidade operacional do porto de Imbetiba.

O modelo baseado em Xu et al. (2011) revisado inclui duas restrições técnicas e outra que fornece maior flexibilidade para programação. As primeiras são restrições de fixação de horários de atracções e de janelas de tempo para atracções. A terceira é permitir que uma atracção possa atravessar o horizonte de programação, isto é, seu tempo de término ser superior ao total de horas de berço da semana. Além disso, foram adicionadas folgas entre atracções consecutivas como margem de segurança e tempo de manobra das embarcações.

Outra mudança feita no modelo diz respeito a função objetivo. Ao relaxar as restrições de espaçamento entre viagens e conjugados para penaliza-las na função objetivo surge um problema de subjetividade nessa medida de desempenho. Qual a melhor métrica para avaliar a função objetivo? Essa pergunta não tem uma resposta fechada na medida em que o valor da função fornece uma avaliação qualitativa da programação. Minimizar a soma dos desvios, embora seja uma forma mais simples de direcionar a melhoria da solução, tem um grave defeito com relação a soluções de mesmo valor objetivo.

A Tabela 3.1 a seguir mostra como duas soluções supostamente indiferentes podem ser consideravelmente distintas em termos operacionais. Tanto o caso 1 como o caso 2 apresentam uma soma de desvios de 58, porém a maior diferença em relação ao ideal no primeiro é de 48 contra 12 no segundo. Para se ter ideia do impacto dessa diferença na aplicação real um *cluster* de sondas deve receber atendimento a cada 56 horas. Se um par de atracções tiver essa diferença de 48 horas em relação as 56, isso significa programar o mesmo conjunto de unidades para receberem atendimentos com 8 horas de diferença, o que é completamente inviável.

Variáveis	Valor dos desvios	
	Caso 1	Caso 2
X1	48	9
X2	6	9
X3	3	10
X4	0	12
X5	1	10
X6	0	8
<b>Soma</b>	<b>58</b>	<b>58</b>

<b>Máximo</b>	<b>48</b>	<b>12</b>
---------------	-----------	-----------

Tabela 3.1: Avaliação de duas métricas para função objetivo

Com essa percepção, a formulação foi adaptada para minimizar a maior das diferenças em relação aos intervalos ideais de viagem. Essa abordagem permite que o tomador de decisão possa ter a escolha de parar o processamento do modelo, se este for muito demorado, quando verificar que já encontrou uma solução que, embora não seja perfeita, nem a ótima do problema, já é capaz de atender suas principais necessidades.

### Conjuntos e índices:

Berços;  
Rotas;  
Conjugados;

### Parâmetros:

$d_j$  tempo para processar rota  $j$  no porto;  
 $L_{prec}$  intervalo de tempo ideal entre viagens de uma mesma rota;  
 $L_{conj}_{j,r}$  intervalo de tempo ideal entre rotas conjugadas;  
 $Bincomp_{i,j}$  binário que indica se berço  $i$  é incompatível com rota  $j$ ;  
 $prec_{j,r}$  binário que indica se rota  $j$  precede rota  $r$ ;  
 $T_{max}$  tempo máximo para programação dos berços;  
horário fixo agendado para atracação  $j$ ;  
horário mais cedo que uma atracação pode começar;  
horário mais tarde que uma atracação pode terminar;  
tempo de folga após a atracação  $j$ ;  
tempo de manobra após a atracação  $j$ ;

### Variáveis de decisão:

binária, igual a 1 se a rota  $j$  antes de  $r$  no berço  $i$ ;  
binária, igual a 1 se a rota  $j$  é alocada no berço  $i$ ;  
tempo de início de  $j$ ;  
binária igual a 1 se a atracação  $j$  for depois de  $r$  e terminar depois da meia noite de domingo;  
máxima diferença entre o intervalo ideal para pares de atracações;  
sobra de tempo positiva e negativa em relação ao ideal entre viagens;  
sobra de tempo positiva e negativa em relação ao ideal entre conjugados;



	(3.55)
<b>s.a.</b>	
	(3.56)
	(3.57)
-	(3.58)
	(3.59)
	(3.60)
	(3.61)
	(3.62)
	(3.63)
	(3.64)
	(3.65)
	(3.66)
	(3.67)
	(3.68)
	(3.69)
	(3.70)
	(3.71)
	(3.72)
	(3.73)
	(3.74)
	(3.75)
	(3.76)
	(3.77)
	(3.78)

A nova função objetivo (3.55) minimiza a maior diferença entre o espaçamento ideal de atracções para clusters e o efetivamente programado. As restrições (3.56) - (3.62) são idênticas às (3.44) - (3.51). As equações (3.64) - (3.66) garantem o atendimento das janelas de tempo para atracções. As restrições (3.67) e (3.68) garantem que o tempo utilizado por uma atracção que passa da ultima hora do

horizonte de programação não se sobreponha as atracções do início da semana. Caso as atracções  $j$  e  $r$  sejam no mesmo berço e  $j$  anterior a  $r$ , a restrição (3.67) obriga que a variável  $x_{jr}$  seja 1, ativando a restrição (3.68). Por sua vez, a restrição (3.68) obriga a atracção  $j$  a ter início num instante de tempo superior a  $t_r$  – que será positivo apenas se o término da atracção  $r$  for posterior a 168 horas. Por fim, as restrições (3.69) - (3.72) são a linearização da função objetivo.

## 4 Experimentação e Análise

Neste capítulo será apresentada a metodologia de experimentos e a discussão dos resultados de implementação dos modelos de acordo com a metodologia apresentada na seção 4.1 a seguir. Nos próximos tópicos os dois grupos de modelos serão estressados para encontrar aquele que seja mais adequado para lidar com conjuntos realistas de dados. Ao longo do capítulo será apresentada a justificativa para a desistência do modelo de variáveis de ordenação baseado em Imai et al. (2003) e os resultados comparativos dos dois tipos de formulação sob o mesmo conjunto de dados.

### 4.1 Metodologia

O trabalho realizado pode ser dividido em 3 blocos: o desenvolvimento de modelo iniciais para o problema de alocação de berços e testes iniciais de validação; escolha do modelo de melhor performance e expansão da formulação para novas restrições; e a experimentação com instâncias realistas.

Todos os modelos foram desenvolvidos com o software de modelagem AIMMS 3.13 x64. As instâncias foram geradas a partir de planilhas em Microsoft Excel® 2013 com auxílio de macros em *Visual Basic for Applications* (VBA). O *solver* escolhido para resolução dos problemas de otimização foi o GUROBI® versão 5.6. O computador utilizado foi um servidor Windows Server 2008® com 2 processadores Xeon E5-2620 e 160 GB de memória RAM.

Após a fase de desenvolvimento cada modelo foi avaliado com conjuntos de dados simplificados afim de validar sua aderência ao problema bem como seu desempenho. O problema real envolve muitas restrições e a avaliação da qualidade da solução pode se dar sob diferentes medidas. Sendo assim, foi considerado mais adequado o desenvolvimento de modelos mais simples, no primeiro estágio de desenvolvimento, para em seguida adotar modelagens mais verossímeis derivadas da formulação escolhida.

Por fim, após selecionado o modelo melhor adaptado para o problema, sua formulação foi estendida para conter um conjunto maior de restrições operacionais como as paradas de manutenção, atividades com horários fixos ou de turnos. Essa versão final da formulação foi utilizada para estudar 4 cenários realistas: com *clusters* conjugados; sem *clusters* conjugados; com aumento de capacidade e conjugados; e com aumento de capacidade e sem conjugados.

#### **4.1.1 Fluxograma de dados e implementação**

Uma etapa considerável do trabalho foi o desenvolvimento dos códigos de pré-processamento e interfaces em ambientes planilha e AIMMS. O fluxograma de funcionamento e operações do modelo, representado na Figura 4.1, apresenta como os dados são processados e transferidos entre os modelos.

Os dados de entrada para a resolução do problema de alocação são inseridos na planilha Excel®. Tais dados incluem (Figura 4.2):

- i) Listagem de atracções/operações;
- ii) Frequência das atracções;
- iii) Compatibilidade das operações com os berços;
- iv) Horários possíveis – fixos ou faixas de horários;
- v) Tempos de Folga e manobra;

Figura 4.1: Fluxograma de funcionamento e operação do modelo de sequenciamento

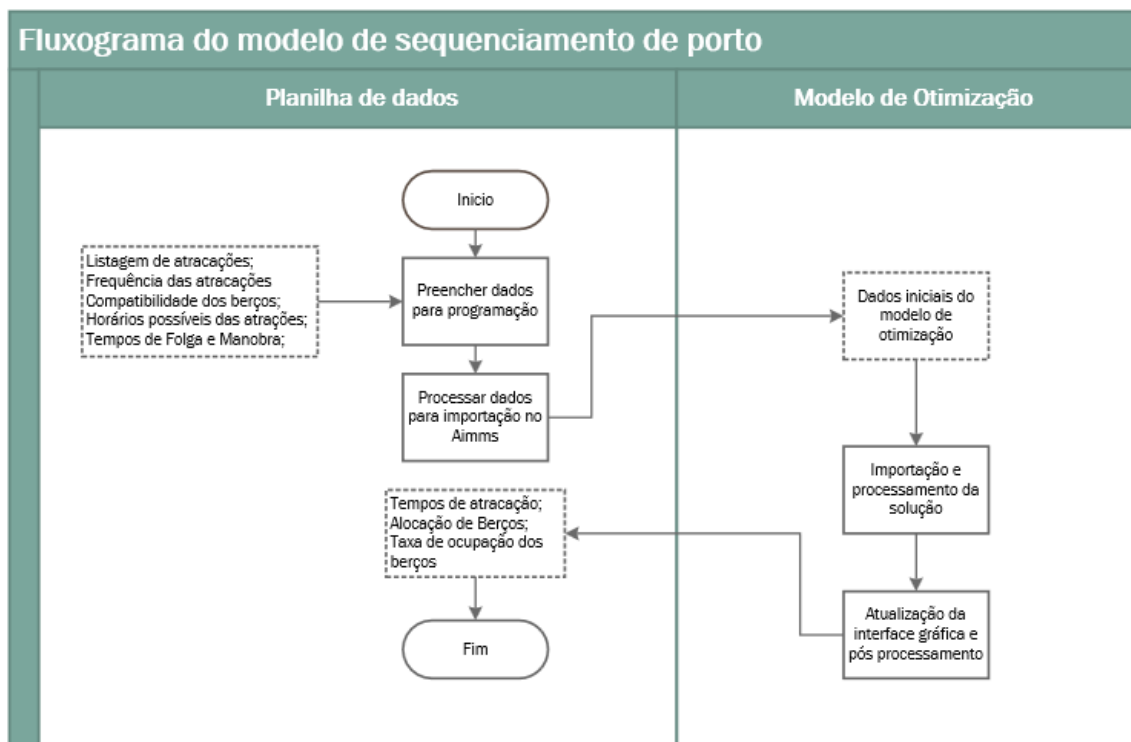


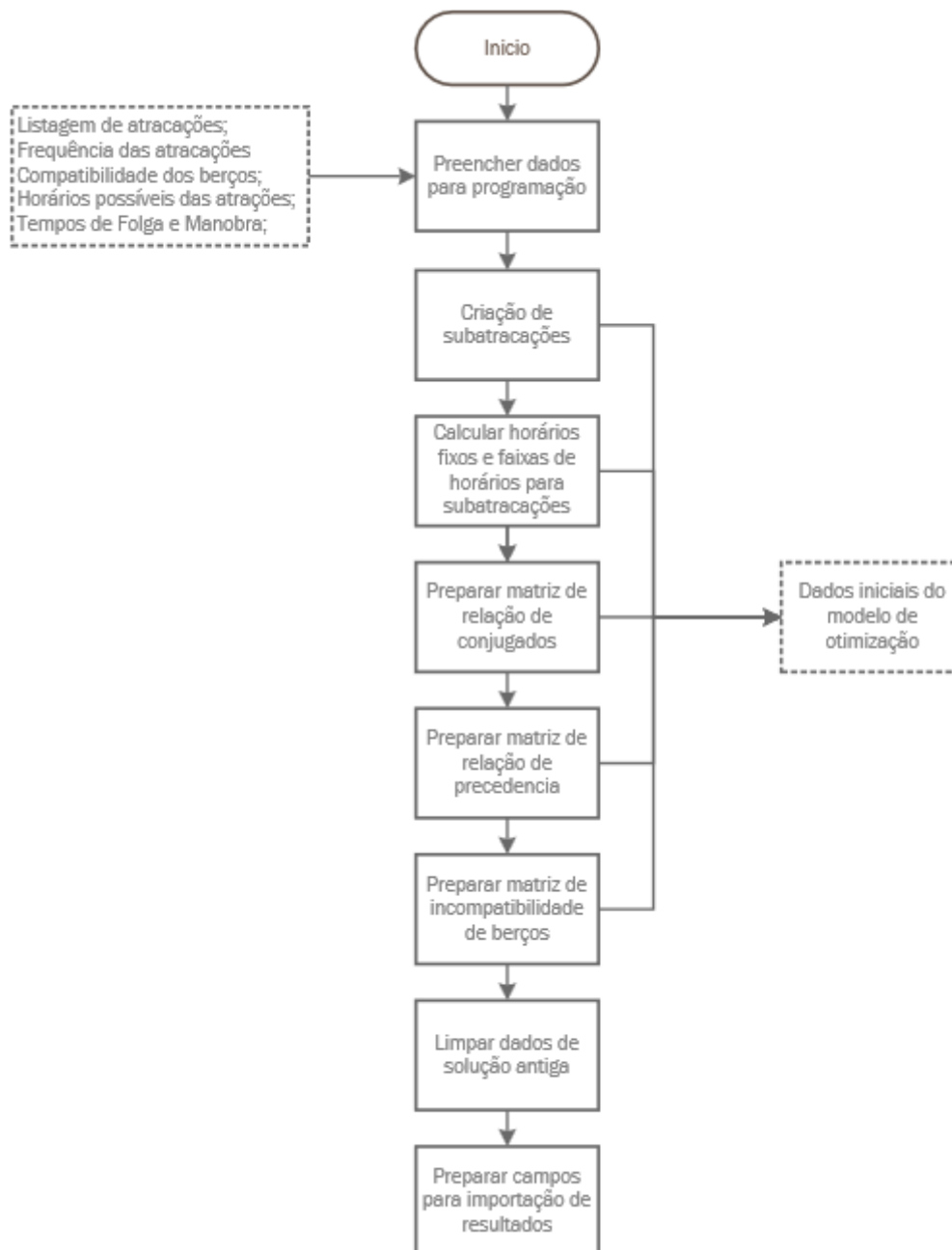
Figura 4.2: Conjunto de dados realistas completo

Nome Cluster/Atracação	Tipo	Atracação	Folga	Manobra	Frequencia	Dia da Semana	Horário fixo	Faixa de Horário	Berco 1	Berco 2	Berco 3	Berco 4	Berco 5	Berco 6
Bombeio de fluidos	Bombeio de fluidos	38		1	1	Sabado	9	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Embarcações especiais	Embarcações especiais	12	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fluidos	Fluidos	100		1	1		-	- -	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MANUTENCAO_1	MANUTENCAO	10		1	1	Quarta	9	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MANUTENCAO_2	MANUTENCAO	10		1	1	Quarta	9	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tubos	Tubos	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CSS 1	CSS	14	2	1	3		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CSS 2	CSS	14	2	1	3		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CSS 3	CSS	14	2	1	3		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP1	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP2	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP3	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP4	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP5	CPP	13	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP6	CPP	13	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP7	CPP	13	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP8	CPP	16	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP9	CPP	11	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP10	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP11	CPP	14	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP12	CPP	16	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
CPP13	CPP	15	2	1	2		-	- -	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_1	NSII	7		1	1	Segunda	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_2	NSII	7		1	1	Terca	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_3	NSII	7		1	1	Quarta	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_4	NSII	7		1	1	Quinta	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_5	NSII	7		1	1	Sexta	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_6	NSII	7		1	1	Sabado	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serv_Extra_7	NSII	7		1	1	Domingo	2	- -	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Troca_Turma_1	Troca_Turma_NSII	8		1	1	Segunda	-	7 18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Troca_Turma_2	Troca_Turma_NSII	8		1	1	Terca	-	7 18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Troca_Turma_3	Troca_Turma_NSII	8		1	1	Quarta	-	7 18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Troca_Turma_4	Troca_Turma_NSII	8		1	1	Quinta	-	7 18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Após o preenchimento dos dados necessários para a programação, todos os elementos que serão importados no AIMMS são preparados através de macro em VBA.

Primeiramente são criadas as subtarefas. Cada atracação agendada nos dados iniciais possui uma frequência, para tal, serão criadas subtarefas de acordo com a frequência de cada atracação. Por exemplo: um *cluster*, CT, com frequência de atracações 2 terá duas subtarefas CT\_1 e CT\_2. A partir daí, as rotinas seguem com a construção dos parâmetros de horários fixos e faixas de horário para cada subatracação, preparação das matrizes de conjugados, precedências e compatibilidade dos berços (Figura 4.3).

Figura 4.3: Fluxograma de processos da planilha de dados

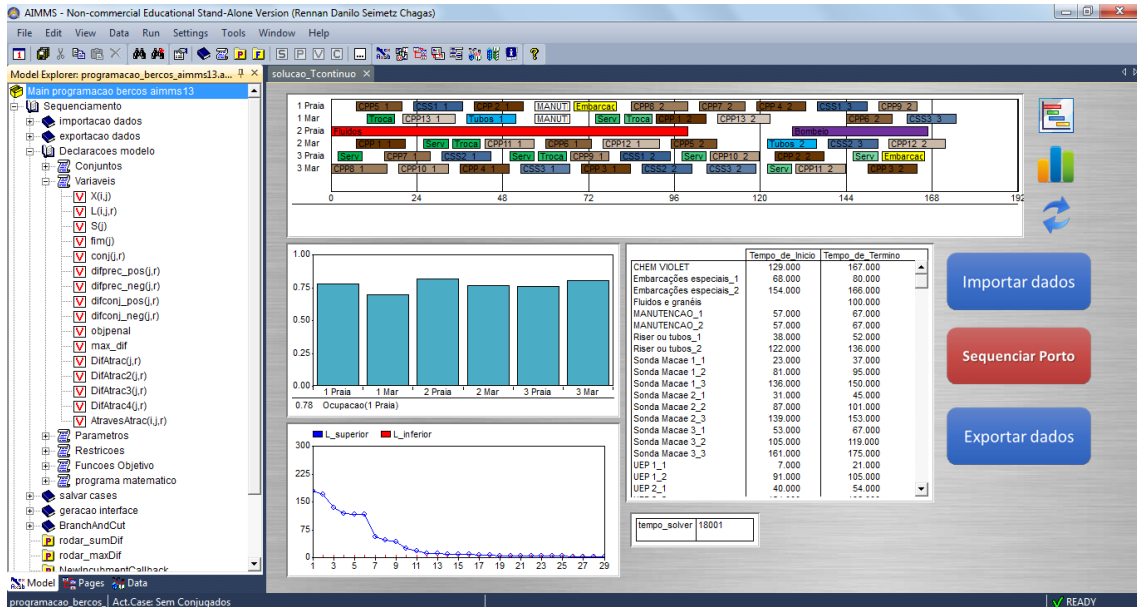


Terminado o pré-processamento, começam as rotinas dentro do ambiente de modelagem do AIMMS. A Figura 4.4, apresenta o fluxograma de processos da interface em AIMMS. Inicialmente os dados precisam ser importados (botão “Importar dados”, Figura 4.5). Após a importação basta clicar em “Sequenciar Porto” e o modelo de programação inteira será construído para em seguida ser resolvido. Ao longo do processamento o usuário pode acompanhar a evolução do algoritmo por meio de um gráfico que apresenta os valores de soluções e limites inferiores. Com o fim do processamento, os dados são devolvidos para a planilha onde são salvos os horários de atracação e a alocação dos berços, junto das informações de ocupação de cada berço.

**Figura 4.4: Fluxograma de processos da interface em AIMMS**



Figura 4.5: Interface gráfica em AIMMS



#### 4.1.2 Pré-processamento do modelo de ordenação

Um ponto relevante a ser destacado e que chamou atenção ao longo do desenvolvimento da formulação é com relação à cardinalidade do conjunto de ordens. Uma abordagem ingênua pode levar a acreditar que, havendo  $n$  tarefas são possíveis até  $n$  posições num mesmo berço. Apesar de válido em termos de modelagem, isto terá impacto direto na quantidade de variáveis e restrições que serão geradas no modelo. Um dos objetivos desta seção será, desse modo, avaliar o impacto da cardinalidade deste conjunto no desempenho computacional da formulação, assim como, propor de melhorias no pré-processamento com intuito de tornar essa formulação mais eficiente.

Uma maneira rápida de reduzir a quantidade de ordens possíveis dentro de um mesmo berço é listar as rotas por ordem crescente de tempo de atracação. Em seguida basta selecionar a maior quantidade de rotas que não superam o tempo máximo de planejamento, que para o problema em estudo é de uma semana.



---

Algoritmo de redução de ordens

---

```
1: cont_max = 0;
2: limite_ordemMax = 0;
3: Ordenar R por duração;
4: for j ∈ R do
5:     cont_max += duração (j);
6:     if cont_max ≤ Tmax then
7:         limite_ordemMax +=1;
8:     end if
9: end for
```

---

Nos passos 1 e 2 do algoritmo são inicializadas as variáveis de contagem de tempo (cont\_max) e limite de ordens (limite\_ordemMax). No passo 3, o conjunto de atracções (R) é ordenado pela duração das atracções. Na sequência começa o laço de repetição para toda atracção na sequencia ordenada de R. A cada passo do laço a contagem de tempo é adicionada pela duração da atracção j na sequencia. Se a contagem de tempo não passou do tempo máximo no horizonte de programação, então essa tarefa pode ser alocada no mesmo berço que as anteriores e, portanto, adiciona-se 1 no limite de ordens.

A utilização do algoritmo de redução de ordens para a instância anterior gera uma melhora significativa na otimização. O número de restrições e variáveis cai drasticamente, o que reduz o tempo gasto para gerar o modelo, número de iterações até chegar ao gap de 0% e, como consequência, o tempo de processamento. Ainda assim seria possível reduzir muito mais o limite de posições. A Tabela 4.1 mostra um comparativo entre um modelo carregado com o limite máximo de posições para as tarefas no berço, um intermediário que utiliza o limite do algoritmo proposto, e o mínimo necessário para satisfazer a solução ótima. O valor mínimo necessário foi encontrado a partir da solução ótima do mesmo problema usando o máximo de ordens possíveis e consiste no número máximo de atracções alocadas em um único berço. Nas colunas cpu e construção, temos o tempo gasto em segundos no processamento da otimização e na construção do modelo respectivamente, seguidas da quantidade de variáveis, restrições e iterações do algoritmo de *Branch-And-Bound*.

A partir desses resultados fica claro o quão sensível é o modelo tamanho do conjunto de Ordens. A redução do tempo de otimização é de 96% com a utilização do

algoritmo de redução de ordens na fase de pré-processamento dos dados do problema, seguida de uma redução de 51% no número de variáveis e de 52% no número de restrições. Por outro lado, ao comparar este resultado com o obtido pelo modelo com o mínimo de ordens para as atracções, fica evidente que, apesar de ajudar muito na eficiência da otimização ainda há possibilidade de ganhar mais eficiência dentro desta formulação.

$ O $	cpu	Construção	Variáveis	Restrições	Iterações
Máximo	681	11,98	6580	203338	36600
Reduzido	28,6	3,495	3214	95422	5956
Mínimo	5,1	0,998	1432	38290	2756

Tabela 4.1: Análise do desempenho por  $|O|$

## 4.2 Análise do modelo matemático com variáveis de ordenação

A Tabela 4.2 apresenta os dados utilizados para a primeira análise do modelo. Os dados consistem em: i) um conjunto de atracções; ii) duração; iii) frequência semanal; iv) as relações de *clusters* conjugados e; v) a relação de compatibilidade de berços. Neste primeiro exemplo, o número de atracções que serão programadas é de 33 atracções – soma de todas as frequências. O horizonte de planejamento consiste num período de uma semana (168 horas). Esse conjunto de dados é bem reduzido em relação ao problema real, que possui cerca de 54 atracções, porém é adequada para avaliações preliminares a respeito do desempenho da formulação e seus pontos de melhoria.

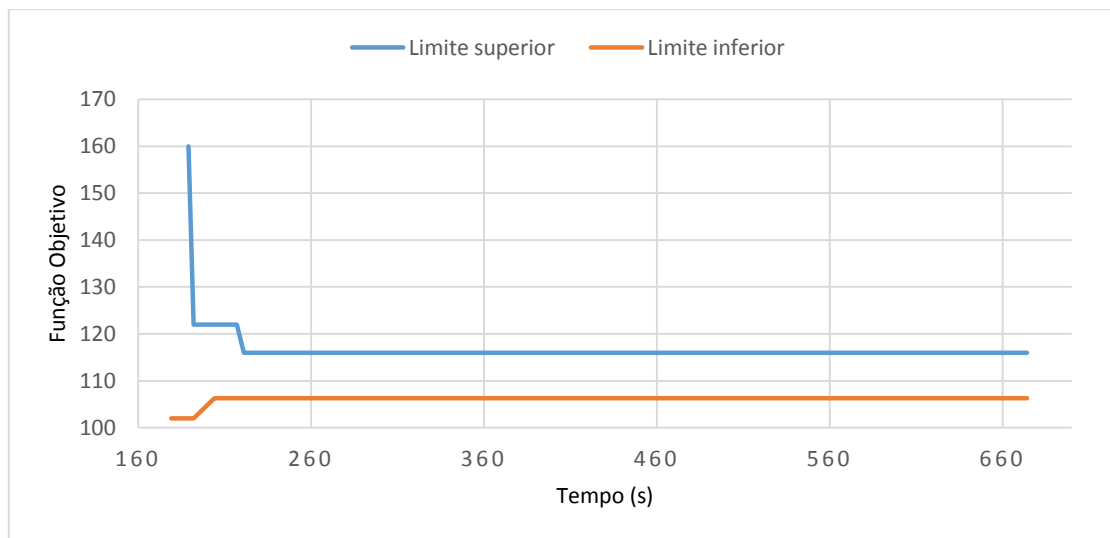
O primeiro modelo se mostrou pouco eficiente do ponto de vista da geração de variáveis e restrições. A instância apresentada gerou 6.580 variáveis e 203.338 restrições e levou um tempo de 681 segundos para chegar ao ótimo. Vale destacar o impacto da restrição (3.5) que, sozinha, contribui com 99,7% do total de restrições. Outro ponto que deve ser ressaltado é com respeito a relaxação do modelo. O gráfico na

Figura 4.6 mostra como a relaxação do modelo está ineficiente. A solução ótima foi encontrada em cerca de um terço do tempo necessário para comprová-la<sup>4</sup>.

Cluster	Atracação (h)	Viagens	Conjugados		Berços					
					1	2	3	4	5	6
UPROD1	10	2	UPROD1	UPROD6		✓	✓		✓	
UPROD2	10	2	UPROD2	UPROD4	✓			✓	✓	✓
UPROD3	10	2	UPROD3	UPROD7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UPROD4	10	2			✓	✓	✓	✓	✓	✓
UPROD5	10	2				✓	✓	✓	✓	✓
UPROD6	10	2			✓	✓		✓	✓	✓
UPROD7	10	2			✓	✓		✓	✓	✓
FLUIDO1	10	7					✓	✓	✓	✓
SONDA1	10	3			✓	✓		✓	✓	✓
SONDA2	10	3			✓	✓		✓	✓	✓
SONDA3	10	3			✓	✓		✓	✓	✓
SONDA4	10	3			✓	✓		✓	✓	✓

Tabela 4.2: Conjunto de dados necessário para o problema

Figura 4.6: Evolução dos limitantes superior e inferior por tempo de processamento – ótimo em 681 s



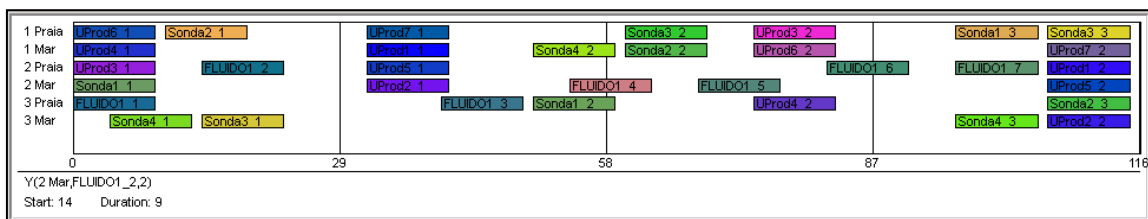
A Figura 4.7 mostra a configuração dessa solução ótima. A quantidade de variáveis geradas na formulação de ordenação aumenta com a cardinalidade do

<sup>4</sup> O relatório de soluções impresso pelo solver Gurobi 5.6 imprime os resultados de acordo com um intervalo de tempo em segundos definido pelo usuário e não pelas iterações ou mudança dos limitantes. O gráfico da Figura 4.6 não apresenta, portanto, o encontro dos limites superior e inferior por ter acontecido fora do intervalo de impressão do relatório.

conjunto de Ordens (índice  $k$ ). O limite trivial para o número de posições que uma dada atracção pode ocupar em um berço é o total de atracções.

Pela visualização da solução na forma de gráfico *gantt* percebe-se o exagero de considerar a possibilidade de um único berço possuir até 33 rotas (total sequenciado na instância). O que poderia ser reduzido para apenas sete. Com vista em melhorar a velocidade para encontrar boas soluções será proposto um rápido método para reduzir o número de elementos no conjunto de Ordens.

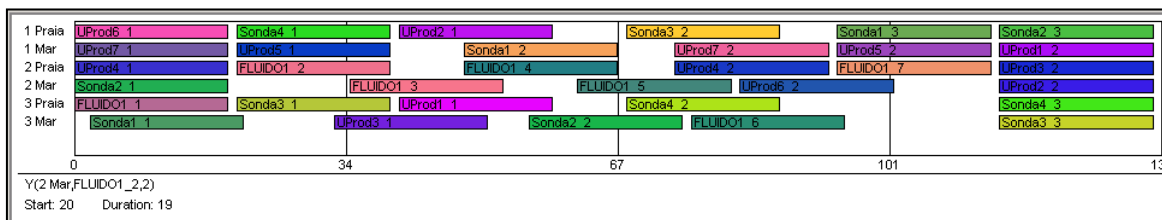
Figura 4.7: Solução viável para primeiro conjunto de dados



Ainda observando a Figura 4.7, poderemos verificar os períodos de tempo em que os berços ficam ociosos, isso se deve pela curta duração das atracções que é bem menor do que o espaçamento mínimo exigido entre elas. Outro ponto a se destacar é a multiplicidade de soluções ótimas. Ao analisar o resultado para o cluster FLUIDO1, pode ser verificado que embora a segunda viagem do cluster comece no limite inferior de sua janela, isto é, apenas 14 horas depois do começo da atracção da viagem 1, ela poderia iniciar livremente até 31 horas depois (abaixo do teto de 34 horas) sem afetar a viabilidade da solução, muito menos a função objetivo.

Já, ao analisar a Figura 4.8, resultado de uma instância onde se elevou o tempo necessário para processar as rotas no porto – de 10 horas para 20 horas, é possível perceber como a solução mínima acaba sendo muito mais difícil de se encontrar. A elevação do tempo de processamento no porto, reduz consideravelmente o tempo ocioso dos berços e dificulta adiantar ou atrasar algumas rotas. Ainda é possível movimentar a sexta viagem de FLUIDO1, mas não mais com a mesma liberdade.

Figura 4.8: Solução viável para o problema com aumento do tempo de atracação



#### 4.2.1 Análise do modelo em função dos dados

Como pôde ser explorado nas seções anteriores, o modelo é muito sensível a variação da quantidade de posições que as rotas podem ocupar nos berços. É de se esperar que quanto menores as durações das atracções, maior a quantidade delas que podem ser alocadas em um berço sem que se ultrapasse o limite de horas no horizonte de planeamento. Isso leva ao aumento do número de variáveis e restrições do problema.

O que parece menos intuitivo é mostrado na tabela Tabela 4.3. O modelo foi testado com 4 instâncias. As três primeiras constituídas de clusters com igual tempo de atracção – 20, 15 e 10 horas respectivamente. A quarta utiliza um conjunto de durações aleatórias entre 10 e 20 horas, o que na média se espera que a torne equivalente, em porte, ao caso com duração de 15h. Embora o problema aumente de tamanho consideravelmente conforme se reduz a duração das atracções, como o limite da relaxação já fica muito próximo do valor ótimo o problema acaba chegando muito rapidamente no gap de 0%. Já no caso de tempo aleatórios, o modelo fica um pouco menor do que no caso de tempos baixos, mas consegue ser resolvido em otimalidade de forma muito mais rápida do que no caso de tempos médios.

Instância	Atracção	cpu	Construção	Variáveis	Restrições	Iterações	gap
1	20	2140,973	1,17	1630	44638	5082138	5,97%
2	15	870,642	1,75	2224	63682	1370238	0,82%
3	10	28,60	3,495	3214	95422	5956	0,00%
4	[10,20]	70,56	2,621	2818	82726	22475	0,00%

Tabela 4.3: Comparação do desempenho para diferentes tempos de atracção

### 4.3 Comparação entre os modelos com variáveis de ordenação e sequenciamento

Com intuito de verificar a qualidade da formulação de ordenação proposta na seção 3.1.1.2 e da formulação de sequenciamento da seção 3.1.2.1, ambas avaliadas com base em 95 instâncias de teste. Para esta análise algumas simplificações foram feitas. Os dados de teste consideram apenas atracções de unidades de produção e sondas com frequências 2 e 3 respectivamente. Cada instância é do tipo  $U_x\_S_y\_B\_z$ , onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as quantidades de: atracções de unidades de produção; atracções de sondas; e berços disponíveis.

Para verificar qual formulação seria efetivamente utilizada para a expansão da modelagem, o mesmo conjunto de instâncias foi utilizado para testar os modelos com variáveis de ordenação e com variáveis de sequenciamento. Foi pretendido testar também a formulação de ordenação inspirada no trabalho de Imai et al. (2003), porém seu desempenho foi muito baixo mesmo com as instâncias mais fáceis, e optou-se por excluí-lo da discussão de resultados.

Nenhuma das publicações levantadas na revisão bibliográfica apresentou um experimento similar com intuito de comparar duas formulações para o problema de alocação de berços. As formulações apresentadas nessa dissertação têm como objetivo lidar com uma variante mais geral do BAP e essa é uma das principais contribuições deste trabalho para a literatura sobre o problema de programação de berços portuários.

A quantidade de *clusters* de Unidade de Produção (PROD) varia de 10 a 15, e de Sondas (SONDA) varia de 1 a 7. Para cada par de quantidades de unidades de produção e sondas ( $x,y$ ) foi utilizada a quantidade mínima de berços ( $z$ ) para tornar o problema viável e, em seguida, mais duas instâncias foram criadas adicionando 1 e 2 berços em cada. Dessa forma é possível verificar o quanto a sobrecarga do porto pode dificultar a busca por soluções de qualidade. A Tabela 4.4 apresenta o exemplo de uma dessas instâncias para o caso com 10 *clusters* de unidades de produção, 3 de sondas e 3 Berços (U10\_S3\_B3).

Cluster	Atracação (h)	Frequência	Conjugados		Berços		
					1	2	3
PROD_1	10	2	PROD_1	PROD_6	✓	✓	✓
PROD_2	15	2	PROD_2	PROD_7	✓	✓	✓
PROD_3	17	2	PROD_3	PROD_8	✓	✓	✓
PROD_4	16	2	PROD_4	PROD_9	✓	✓	✓
PROD_5	11	2	PROD_5	PROD_10	✓	✓	✓
PROD_6	15	2			✓	✓	✓
PROD_7	15	2			✓	✓	✓
PROD_8	11	2			✓	✓	✓
PROD_9	18	2			✓	✓	✓
PROD_10	11	2			✓	✓	✓
SONDA_1	20	3			✓	✓	✓
SONDA_2	18	3			✓	✓	✓
SONDA_3	16	3			✓	✓	✓

Tabela 4.4: Exemplo dos dados para a instância U10\_S3\_B3

Os resultados mostram como o tempo de processamento aumenta significativamente com o aumento da taxa de ocupação dos berços. Em todos os casos com adição de 2 berços o problema foi resolvido até a solução ótima. Para os casos com mais do que 41 atracções, dificilmente foi possível chegar à uma solução comprovadamente ótima. A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos tempos de processamento das instancias por número de atracções. As três colunas principais compreendem o número de atracções, e os resultados dos casos de ociosidade baixa, média e alta para os modelos de sequenciamento e ordenação respectivamente.

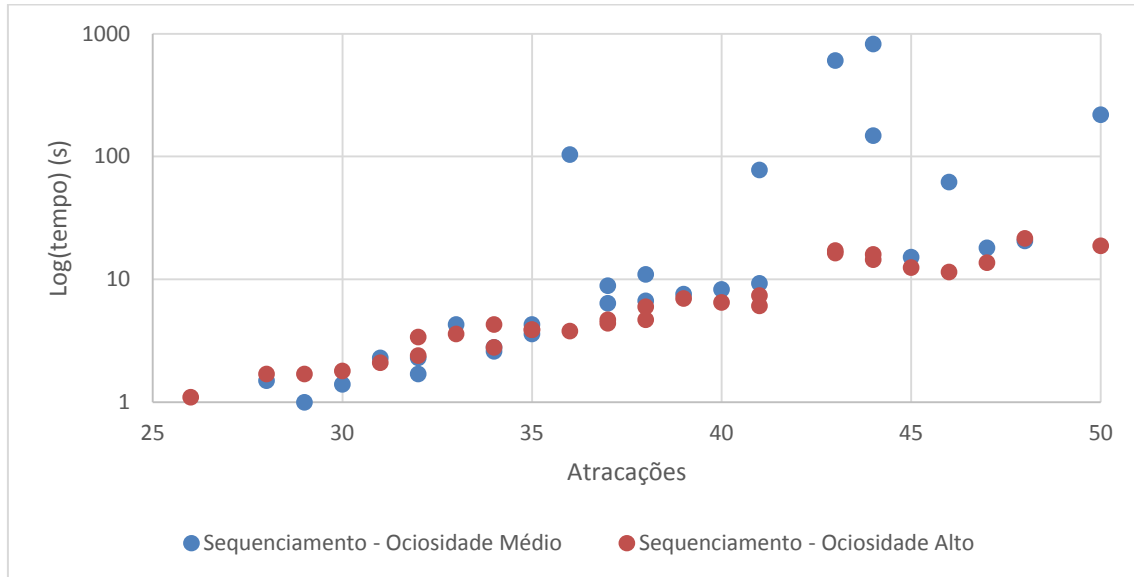
Os resultados mostram como a capacidade do porto é determinante para o processamento de soluções ótimas (Figura 4.9 e Figura 4.10). Para os dois tipos de formulação os tempos de processamento são consideravelmente mais rápidos para os casos de maior ociosidade do porto. Nas clássicas notações de complexidade de problemas de otimização, o mais natural de se esperar é que o tempo de processamento seja influenciado pelo número de atracções – justamente por isso, a complexidade de um problema é costumeiramente representada apenas pelo tamanho da entrada como nos casos de problemas polinomiais  $O(n^m)$ . Esse comportamento é verificado, mas não se mostrou determinante.

Número de atracações	Modelo de Sequenciamento (Ociosidade do porto)			Modelo de Ordenação (Ociosidade do porto)		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
26	236,4	0,7	1,1	-	11,029	14,742
29	1491,4	1	1,7	-	393,247	13,307
32	2,5	2,3	3,4	-	61,886	135,081
35	103,6	3,6	3,9	-	814,372	49,312
38	170,7	6,7	4,7	-	1269,099	126,548
41	-	77,9	6,1	-	6171,338	5382,58
44	-	148,3	14,5	-	6649,277	6570,544
28	68,8	1,5	1,7	-	48,61	32,292
31	1415,9	2,3	2,1	-	5634,023	39,421
34	147,3	2,8	4,3	1976,642	726,762	71,917
37	-	8,9	4,7	-	3656,133	184,143
43	-	606,2	16,4	-	-	-
46	-	62,1	11,5	-	5676,44	2181,502
30	-	1,4	1,8	-	1713,016	53,867
33	5,2	4,3	3,6	-	252,862	84,49
36	-	104	3,8	-	6571,058	108,655
39	-	7,6	7	-	-	231,24
45	-	15,2	12,5	-	-	484,961
48	-	20,6	21,6	-	-	2068,214
32	-	1,7	2,4	-	-	85,66
35	256,9	4,3	3,9	-	625,221	70,7
38	-	11	6	-	-	856,383
41	-	9,3	7,4	-	-	-
44	-	825,9	16	-	-	1376,038
47	-	18,1	13,7	-	-	155,268
50	-	219,4	18,8	-	-	6033,651
34	-	2,6	2,8	-	749,631	141,181
37	119,5	6,4	4,4	-	287,431	167,046
40	-	8,3	6,5	-	-	-
43	-	-	17,2	-	-	1962,181

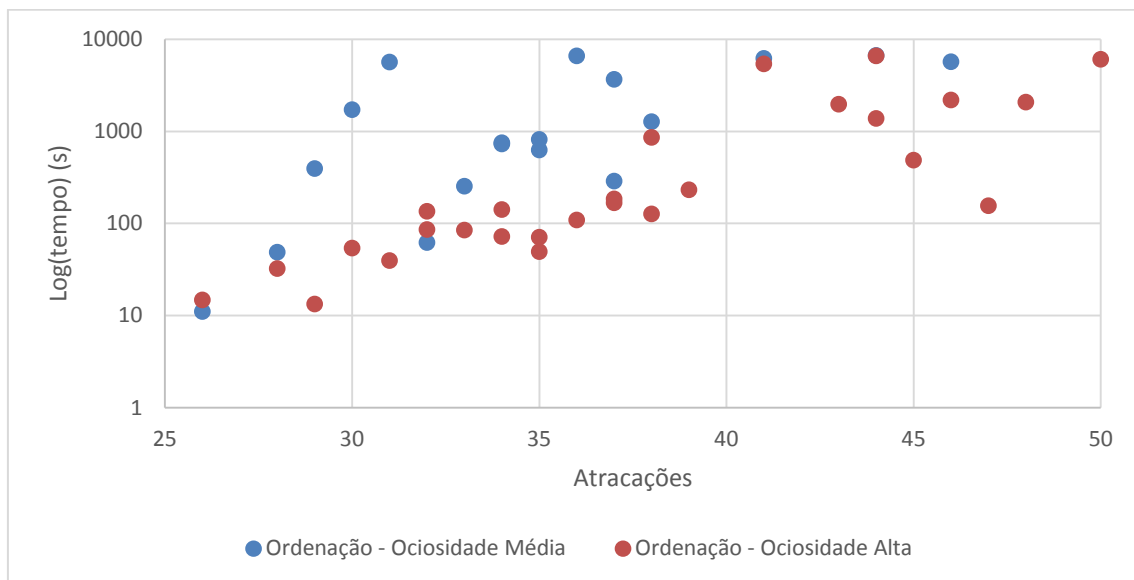
**Tabela 4.5: Resumo dos tempos de processamento para cada instância**



**Figura 4.9: Tempo de processamento x n° de atracções por nível de ociosidade - modelo de sequenciamento**



**Figura 4.10: Tempo de processamento x n° de atracções por nível de ociosidade - modelo de ordenação**



Ainda com relação aos tempos de processamento, podemos verificar a superioridade dos modelos de sequenciamento (Figura 4.11 e Figura 4.12). Este é muito mais rápido do que o modelo de ordenação para todas as instâncias onde ambos chegaram a solução ótima. Desta vez, fica um pouco mais fácil de perceber pela Figura 4.12 que, de fato, tempo de processamento demonstra ser exponencial com relação ao número de atracções. Essa relação fica mais visível apenas nos casos onde a capacidade do porto não foi preponderante.

Figura 4.11: Tempo de processamento com ociosidade média do porto x nº atracções para os dois modelos

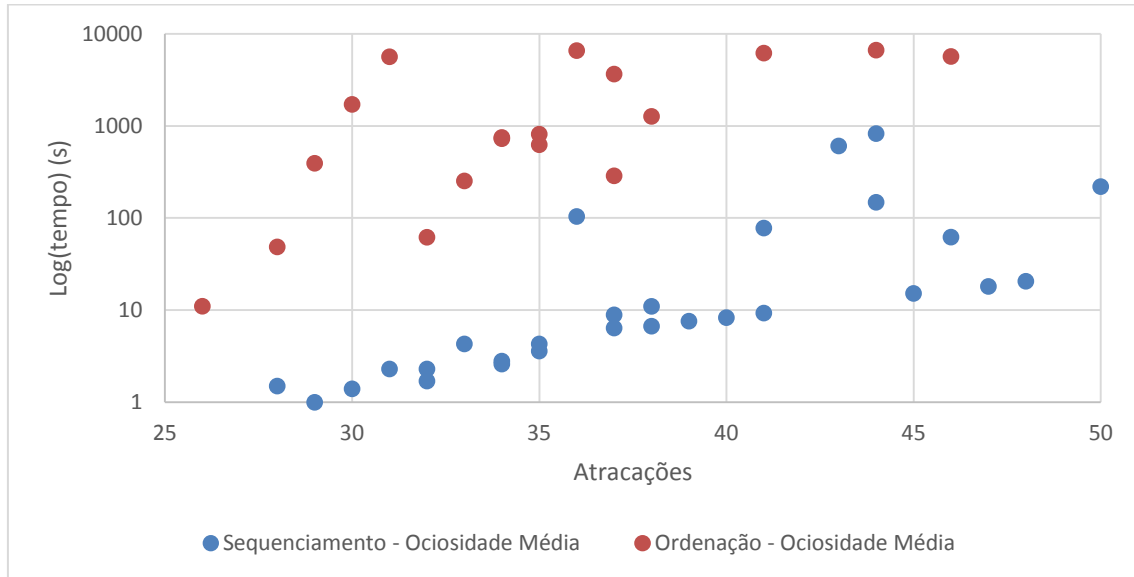
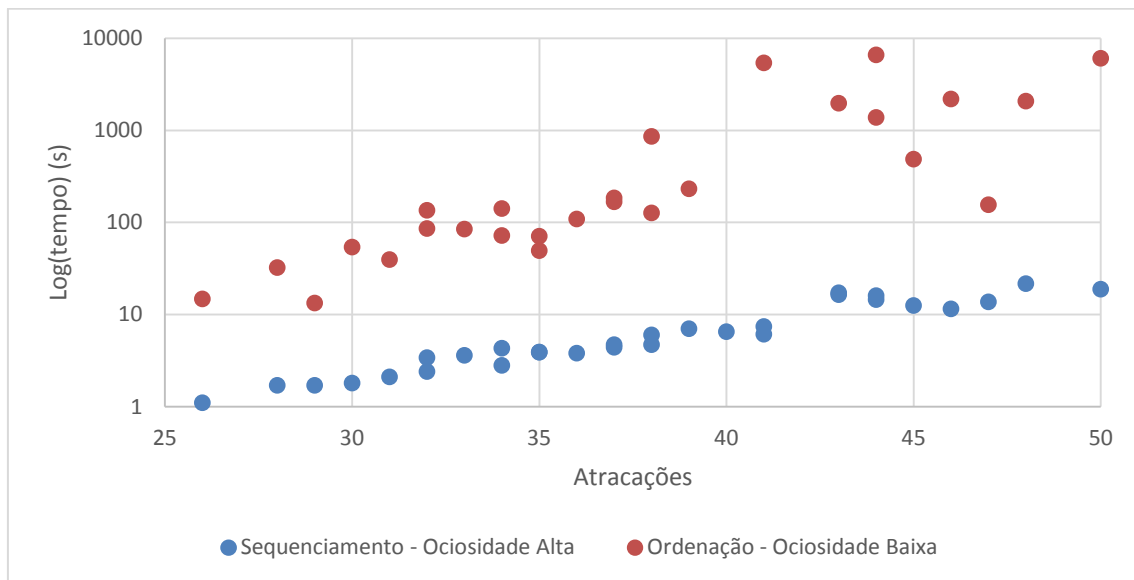


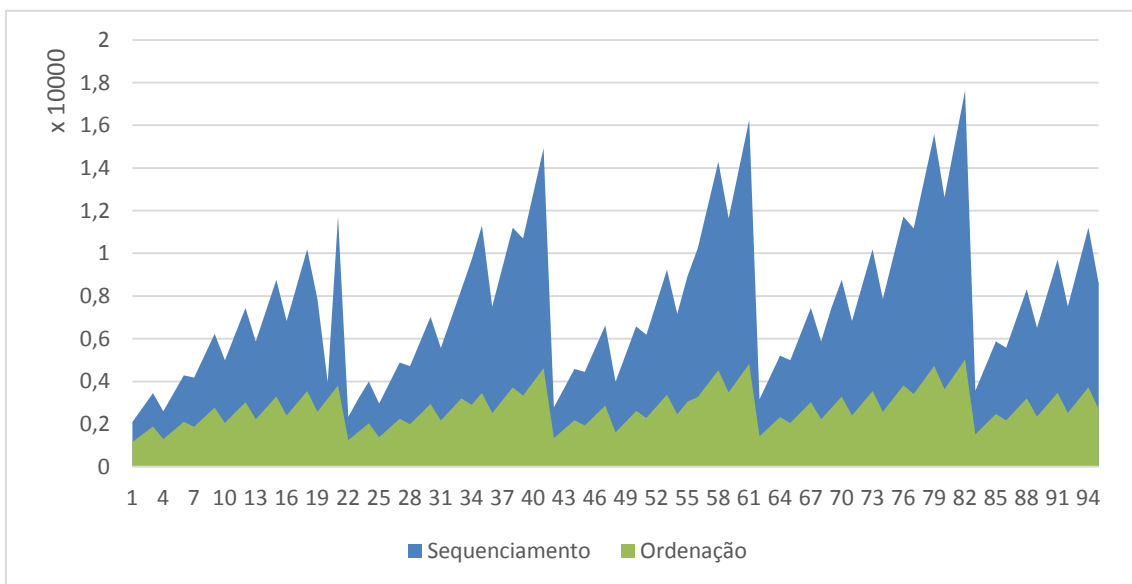
Figura 4.12: Tempo de processamento com ociosidade alta do porto x nº atracções para os dois modelos



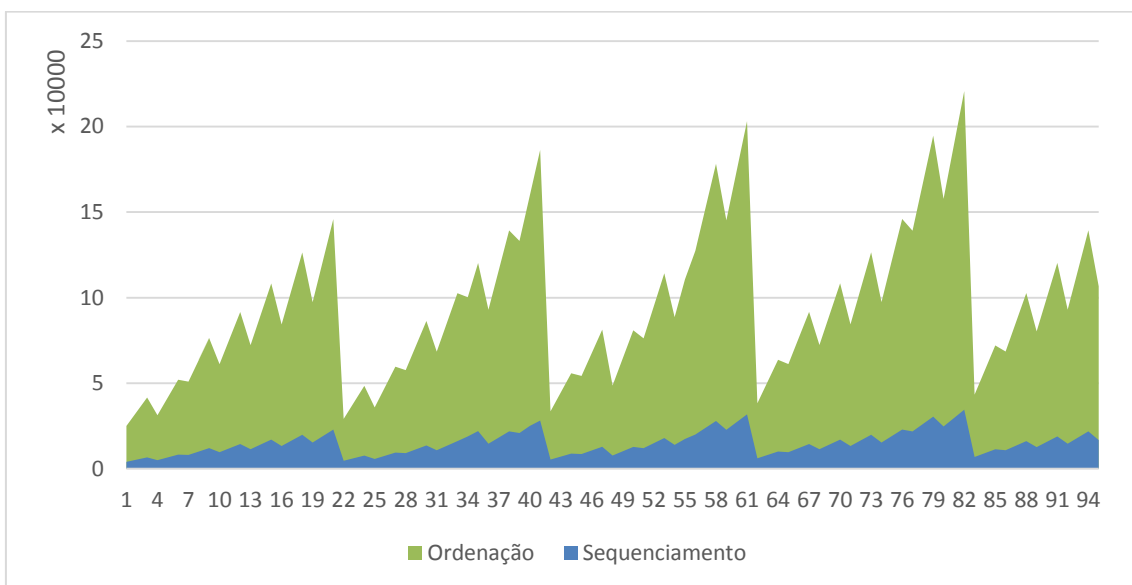
A formulação derivada de sequenciamento, embora produza uma quantidade maior de variáveis (Figura 4.13) reduziu de forma muito significativa a quantidade de restrições necessárias para modelar o problema (Figura 4.14). Com efeito, as matrizes dos problemas de otimização conseguem ser muito menores (Figura 4.15) do que no modelo de ordenação.

Outro ponto que vale chamar atenção pela análise dos resultados é com relação a relaxação do problema. Em todas as instâncias em que não se atingiu uma solução comprovadamente ótima o limitante dual se manteve inalterado com relação ao valor obtido pela relaxação da restrição de integralidade. Isso aponta que um caminho para aumentar a eficiência do método de resolução é investir no fortalecimento do modelo pela adição de cortes válidos.

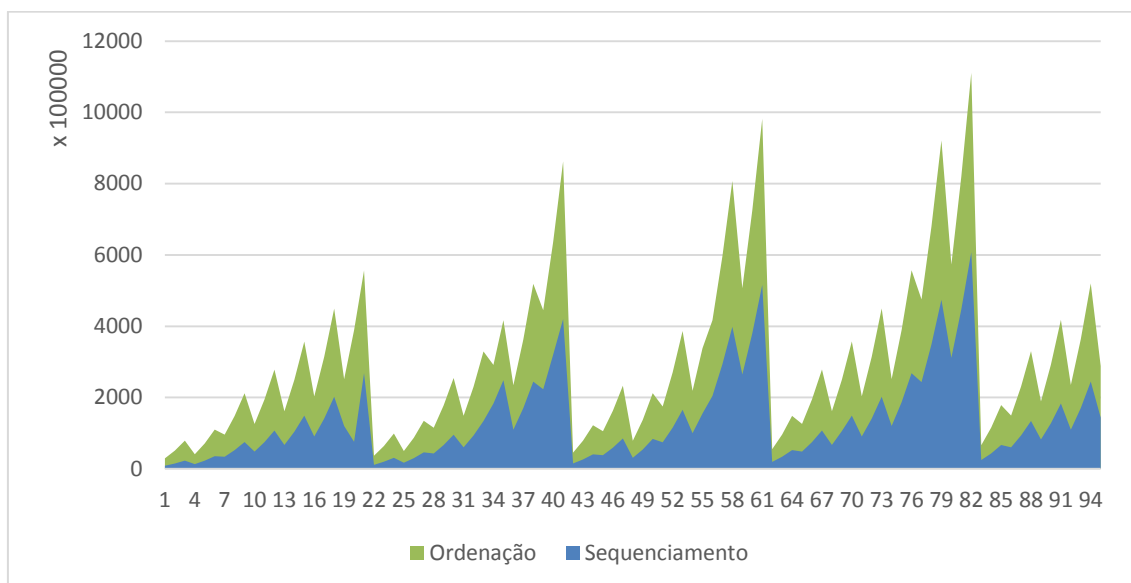
**Figura 4.13: Quantidade de variáveis por instância**



**Figura 4.14: Quantidade de restrições por instância**



**Figura 4.15: Dimensão da matriz do problema por instâncias**



A formulação com variáveis de sequenciamento conseguiu encontrar uma solução viável para todas as instâncias sendo ótimas em 77% dos casos contra 49% para o modelo com variáveis de ordenação. Além disso, em todos os casos avaliados em que ambos modelos encontraram soluções viáveis, o modelo de variáveis de ordenação foi mais lento ou produziu soluções de qualidade inferior (Tabela 4.6).

<b>Formulação</b>	<b>Xu et al. (2011)</b>	<b>Duhamel et al. (2012)</b>
Solução melhor do que o outro modelo	63/95	0/95
Encontrou a solução Ótima	73/95	46/95
Terminou em solução sub-ótima	22/95	43/95
Nenhuma Solução encontrada	0/95	6/95
Tempo médio para solução ótima (s)	92,2	1564,5

**Tabela 4.6: Resumo da comparação dos modelos**

Em todos os casos onde os modelos atingiram o tempo máximo de processamento e encontraram solução o limite inferior permaneceu em 0. Além disso,

em todas as instâncias onde uma solução ótima foi encontrada, seu valor também era 0. Os resultados para as instâncias com solução ótima encontrada levam a crer que o principal responsável pelo elevado tempo de processamento seja a capacidade do modelo em produzir soluções viáveis durante seu processamento. Além disso, ficou claro a partir do processo de experimentação dos modelos que a formulação com variáveis de sequenciamento é muito superior ao de variáveis de ordenação.

#### 4.4 Análise do modelo em situações realistas

Como apresentado nas seções anteriores, o modelo de variáveis de sequenciamento foi escolhido para implementar as novas restrições, que modelam a maior parte das necessidades operacionais do problema estudado, por conta de seu melhor desempenho computacional. Nesta seção, esse modelo ampliado será testado com diferentes propostas de situações realistas. Cada instância inclui:

- i) Um horário reservado para manutenção no Píer 1 na quarta feira começando as 9 da manhã;
- ii) Treze *clusters* do tipo CPP;
- iii) Três *clusters* do tipo CSS;
- iv) Sete atracções para embarcações do tipo “Serviço extra” começando as 2 da manhã;
- v) Quatro atracções para trocas de turma (segunda, terça, quarta e quinta) no período do dia (7h – 18h) e;
- vi) Berço 3 exclusivo para atracções de Fluídos e Bombeio.

Três instâncias são avaliadas:

- a) Sem conjugados (SC) – não há *clusters* de unidades de produção conjugados

- b) Com conjugados (CC) – Alguns *clusters* são conjugados (Tabela 4.7)
- c) Com aumento de capacidade com e sem conjugados (ECC e ESC) – O que pode ser modelado com a transferência das operações de bombeio de fluidos e de graneis para um berço extra tornando o Berço 3 disponível para qualquer atracação.

<b>CONJUGADOS</b>	
CPP1	CPP2
CPP3	CPP5
CPP6	CPP8
CPP7	CPP10

Tabela 4.7: Clusters conjugados para o caso realista

A Tabela 4.8 apresenta um breve resumo dos resultados obtidos. Cada instância foi processada com um tempo limite de 18.000 segundos (5 horas). Em todos os casos, o limitante dual (inferior) do modelo não saiu do valor zero. Da leitura da mesma tabela, pode-se perceber também o quão mais rápida é a convergência do modelo para as instâncias com aumento de capacidade – fato que já havia sido verificado nos experimentos da seção 4.3.

<b>Instância</b>	<b>Limite Superior</b>	<b>Limite Inferior</b>	<b>cpu (s)</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Restrições</b>
SC	4	0	18.000	22.874	45.261
CC	4,75	0	18.000	22.890	45.285
ECC	0	0	30,95	28.222	55.848
ESC	0	0	5,24	28.206	55.824

Tabela 4.8: Resumo dos resultados para os 4 grupos de instâncias realistas

#### 4.4.1 Sem Conjugados e Com Conjugados

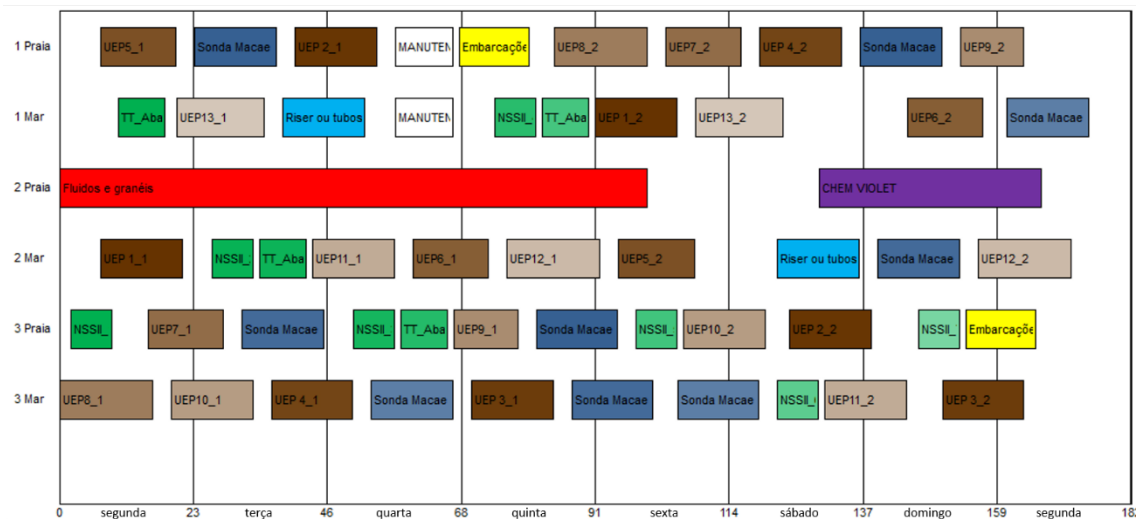
Esse caso gerou um modelo de 22.874 variáveis e 45.261 restrições. Este caso foi processado por 5 horas e chegou a um valor objetivo de 4. Como também será visto nos próximos casos, esse problema de otimização possui muita simetria, o que faz com

muitas soluções tenham o mesmo valor objetivo. Todas as atracções de sonda, por exemplo, possuem mesmo tempo de duração. Bastaria escolher um par de *clusters* e trocá-los de lugar para obter uma solução indiferente.

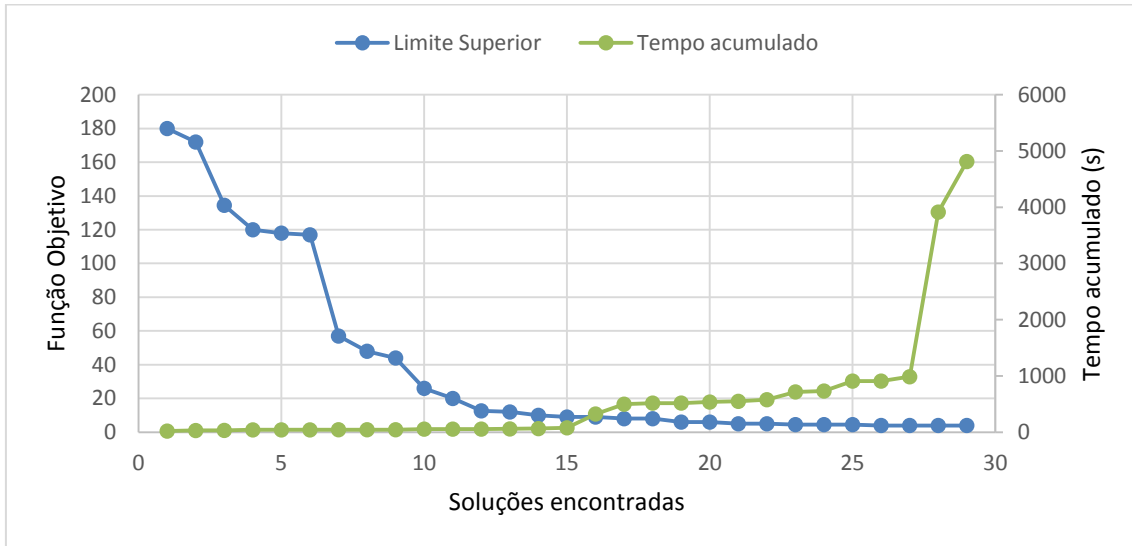
Muitas soluções foram encontradas (29 ao todo) e a evolução da função objetivo apesar de convergir mais rapidamente no primeiro minuto (reduz de 180 horas para 10) (Figura 4.17), cai lentamente até estagnar em 4 horas no tempo de processamento restante. Como o valor do limite inferior não mudou por todo o processamento, muito menos foi possível atingir gap de 0% não é possível dizer o que mais dificultou a descoberta de uma solução ótima – limitante dual ou primal.

Outro ponto importante de se verificar é a taxa de ocupação dos berços. Existe uma ocupação média de 77% do tempo (Figura 4.18). Isso além de dificultar em muito a busca por uma solução ótima pode afetar em muito as operações em mar por conta de atrasos nas entregas derivados do descumprimento da programação do porto.

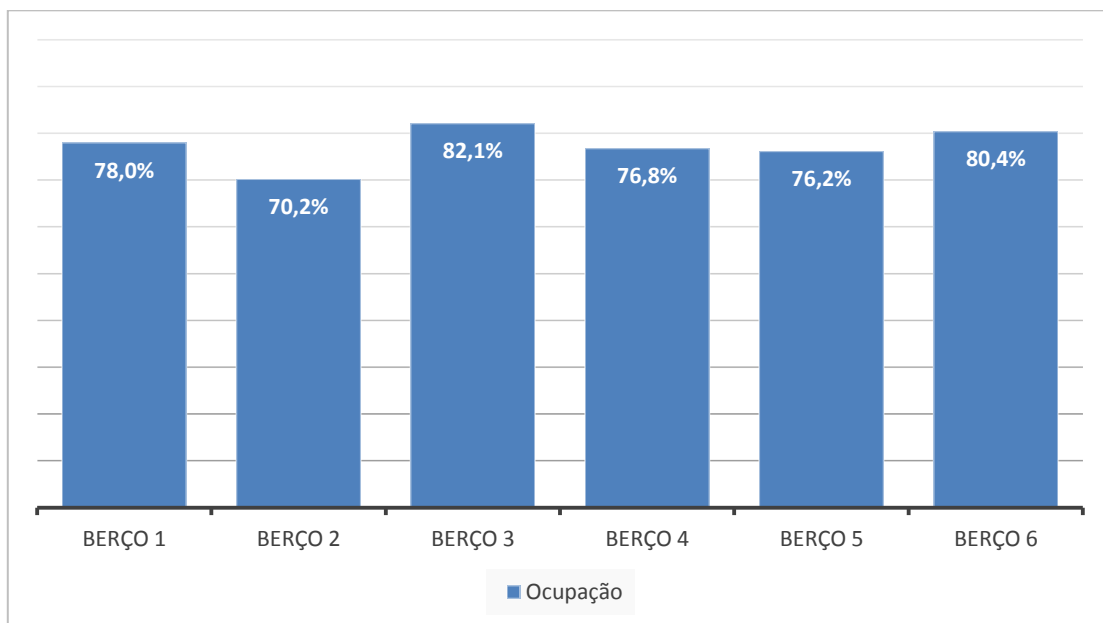
**Figura 4.16: Programação completa sem *clusters* conjugados**



**Figura 4.17: Solução viável e tempo de processamento por solução encontrada no caso sem conjugados**



**Figura 4.18: Taxa de ocupação dos berços no caso sem conjugados**

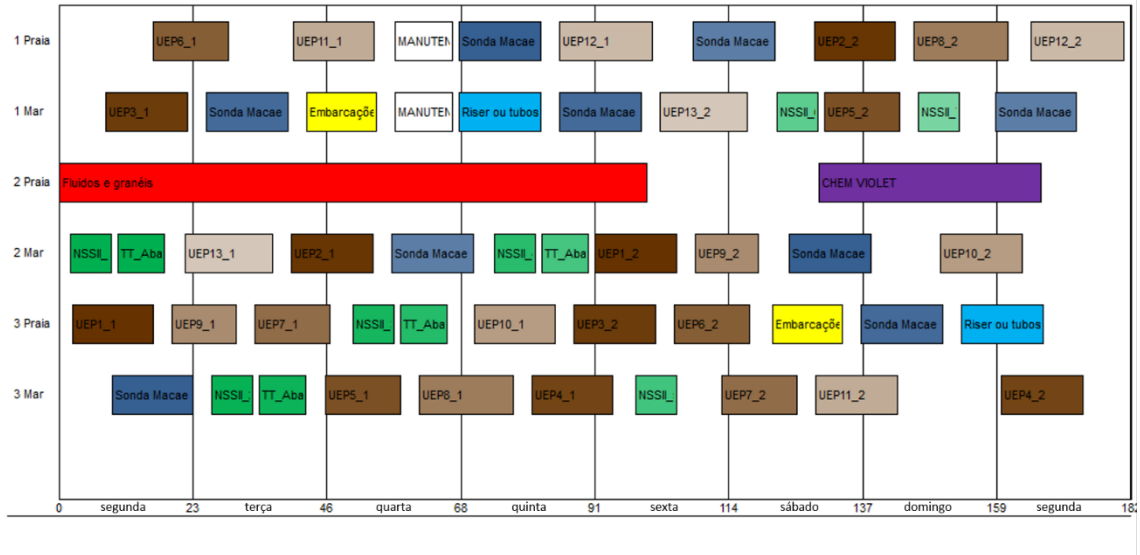


A instância com conjugados gerou um modelo de 22.890 variáveis e 45.285 restrições. Este caso, assim como o anterior, foi processado por cerca de 5 horas e chegou a um valor objetivo de 4,75. O mesmo comportamento para evolução da função objetivo foi verificado (Figura 4.20) o que estava dentro do esperado por conta da

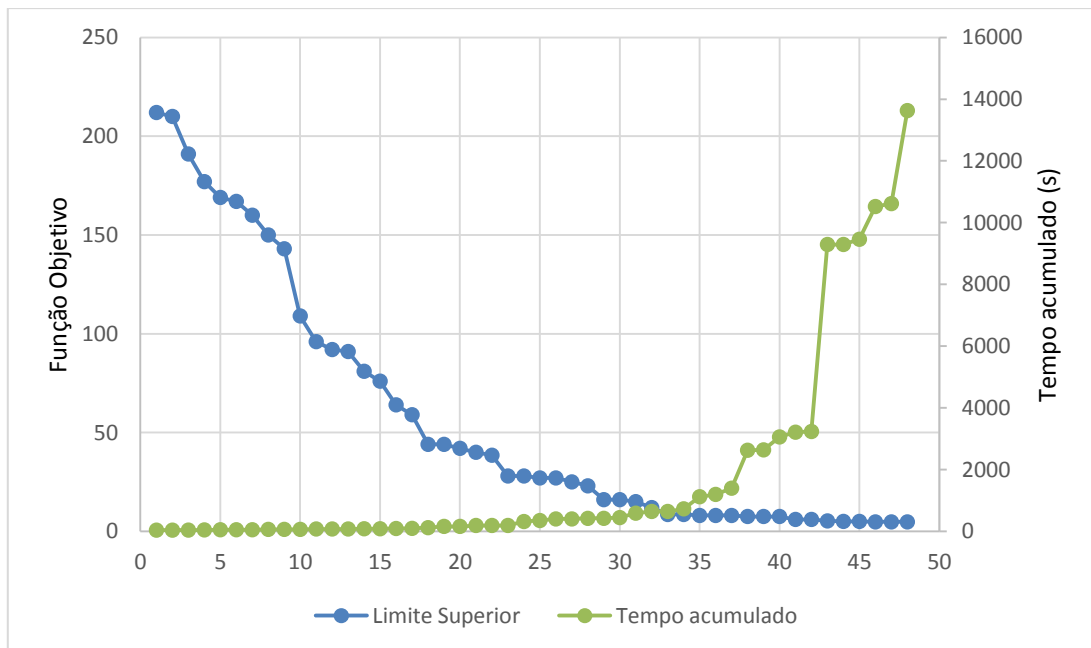


semelhança dos dois casos. A taxa de ocupação média é a mesma, por se tratar essencialmente do mesmo conjunto de atracções (Figura 4.21).

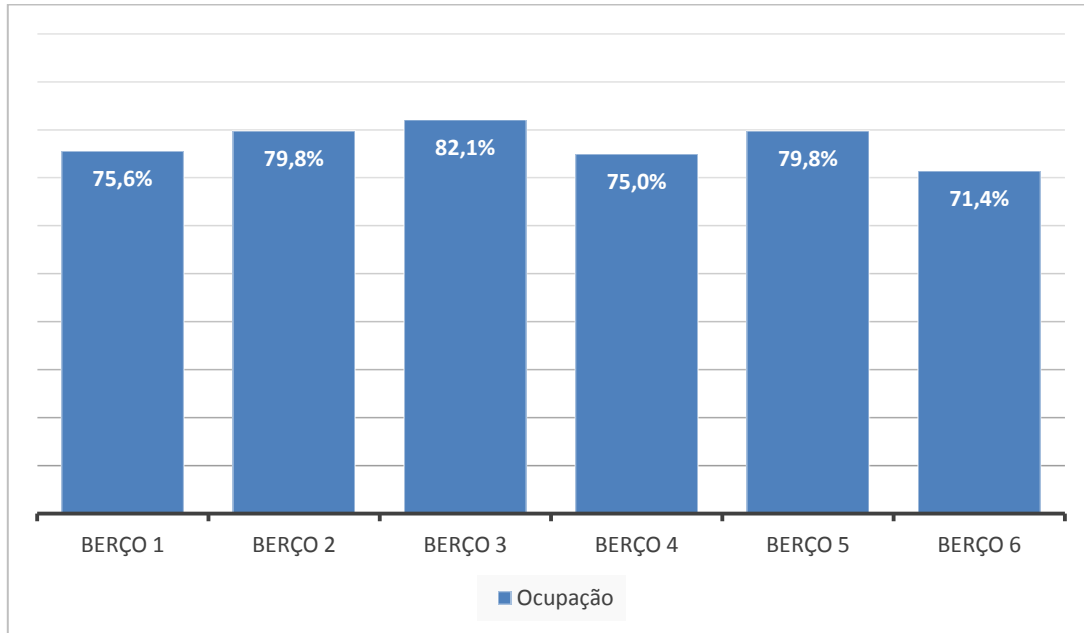
**Figura 4.19: Programação completa com clusters conjugados**



**Figura 4.20: Solução viável e tempo de processamento por solução encontrada no caso com conjugados**

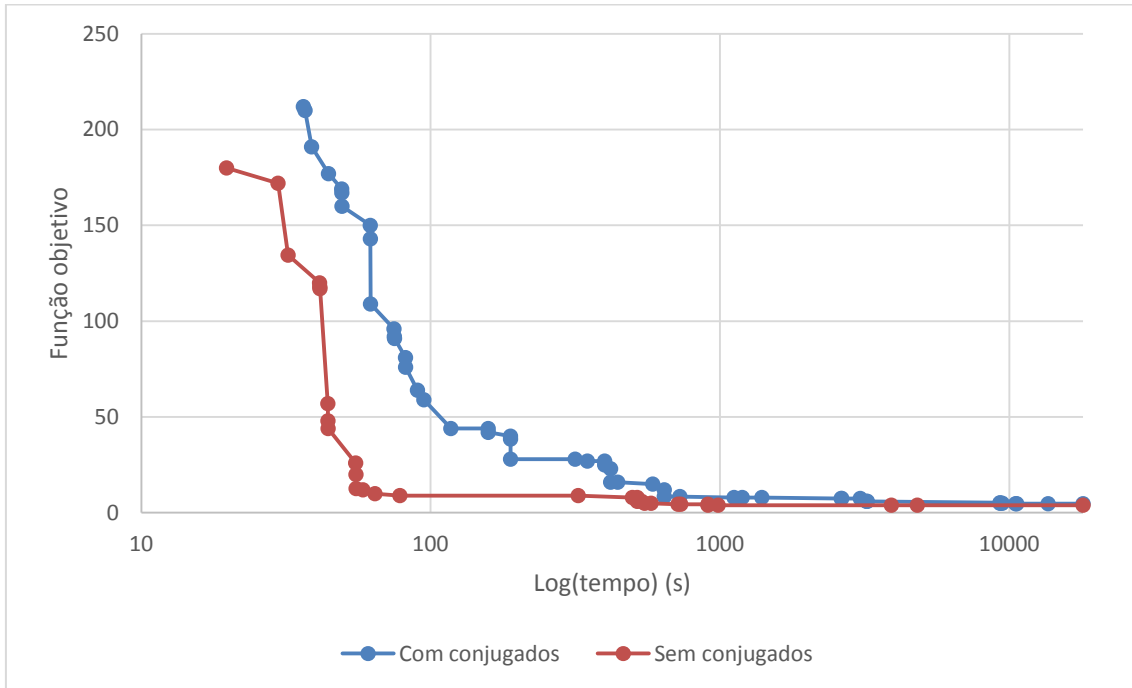


**Figura 4.21: Taxa de ocupação dos berços no caso com conjugados**



Evidentemente, por se tratar de um modelo mais restrito, era esperado que se encontrasse uma solução pior. Isso, todavia, não pode ser garantido. Embora seja certo que o modelo com conjugados sempre terá uma solução ótima no máximo igual, mas nunca inferior, ao modelo sem conjugados, não é possível verificar que sempre se obterá uma solução de pior qualidade no mesmo tempo de processamento. Pode se verificar a convergência mais rápida do modelo sem conjugados como mostrado na Figura 4.22 a seguir. Vale lembrar que em ambos os casos o limite inferior permaneceu estagnado em zero.

Figura 4.22: Soluções encontradas ao longo do processamento - tempo em escala logarítmica



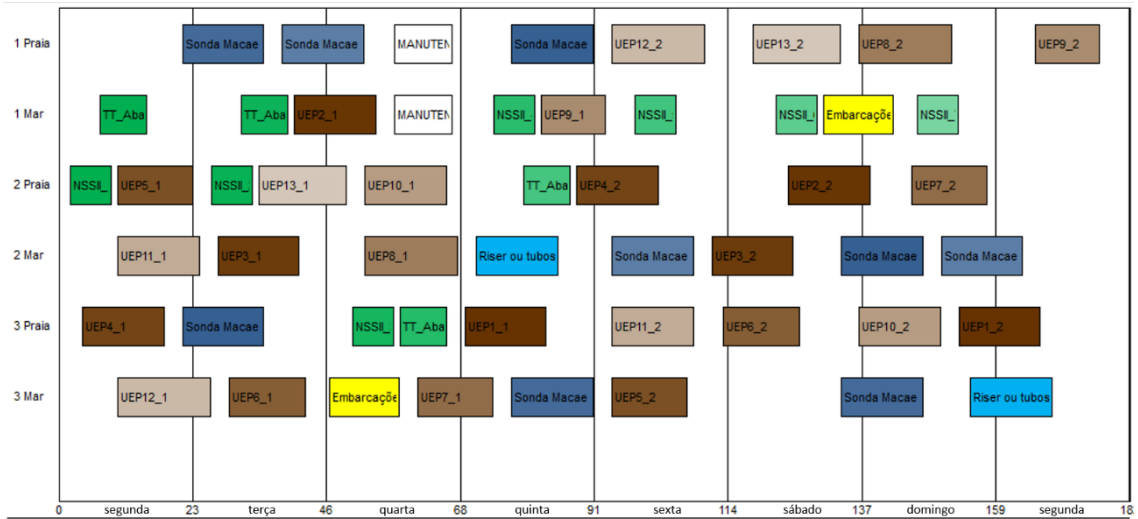
#### 4.4.2 Aumento de capacidade

Uma das possibilidades para aumentar a produtividade do porto é a construção de um berço adicional para transferir as operações com bombeio e fluidos. Como já foi mostrado na seção 4.3, o modelo fica consideravelmente mais rápido na medida em que o porto fica mais ocioso.

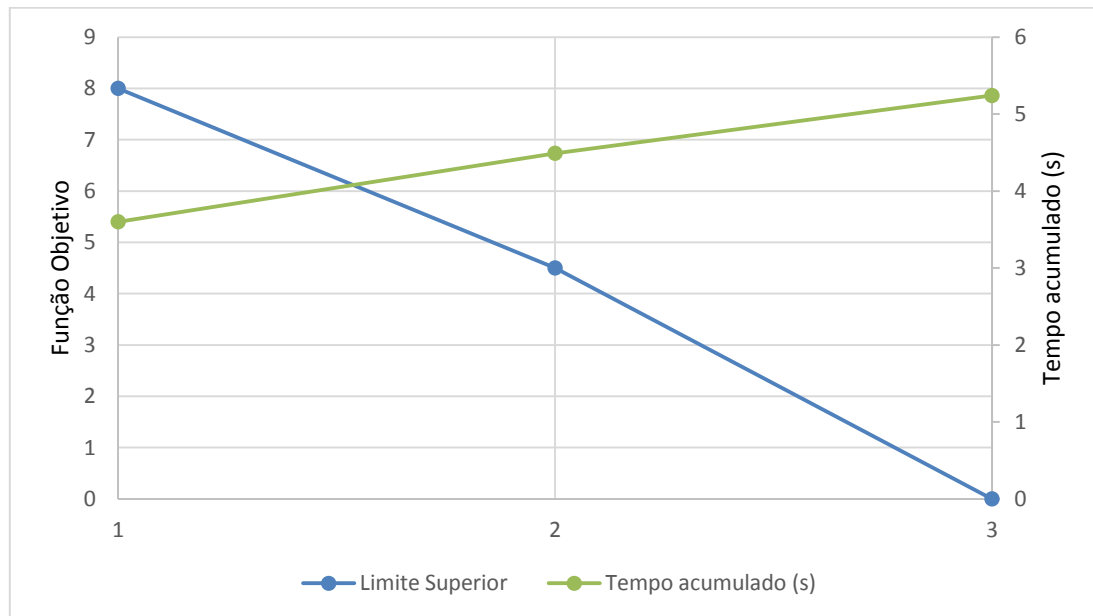
Com intuito de testar o impacto desse investimento na programação foram geradas duas instâncias - com e sem conjugados.

A instância sem conjugados gerou um modelo de 28.206 variáveis e 55.824 restrições. O problema foi resolvido em pouco mais do que 5 segundos (Figura 4.24) e o aumento de capacidade nos berços resultou em um aumento de ociosidade de 10% (Figura 4.25).

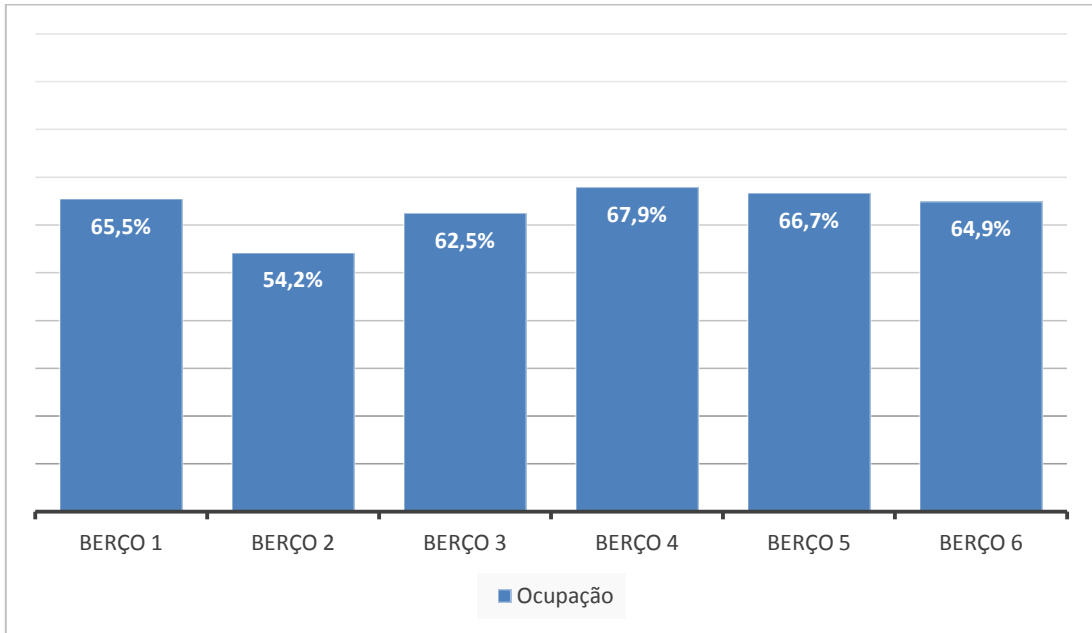
**Figura 4.23: Programação completa com aumento de capacidade e sem *clusters* conjugados**



**Figura 4.24: Solução viável e tempo de processamento por solução encontrada no caso aumento de capacidade sem conjugados**

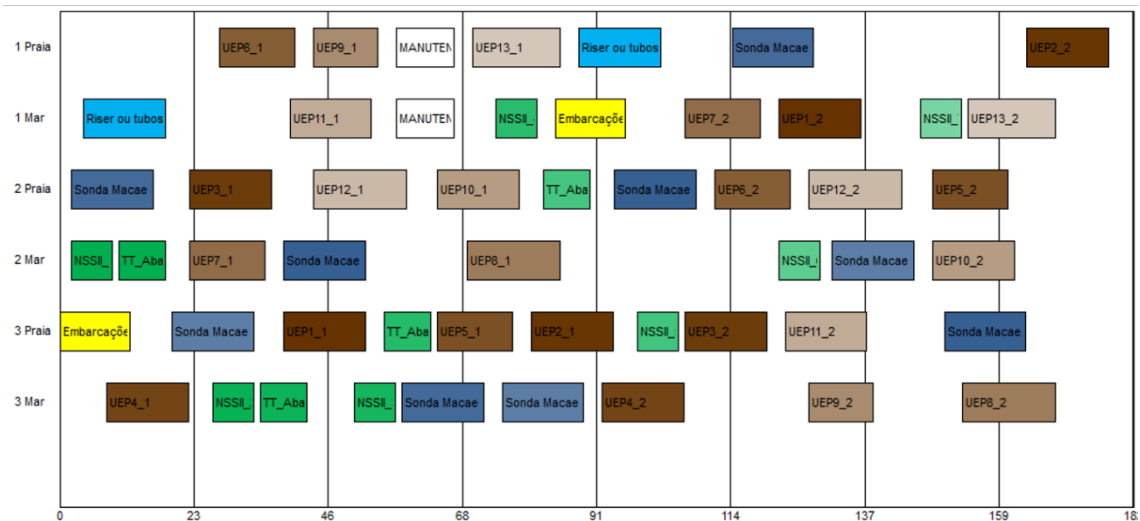


**Figura 4.25: Taxa de ocupação dos berços no caso aumento sem conjugados**

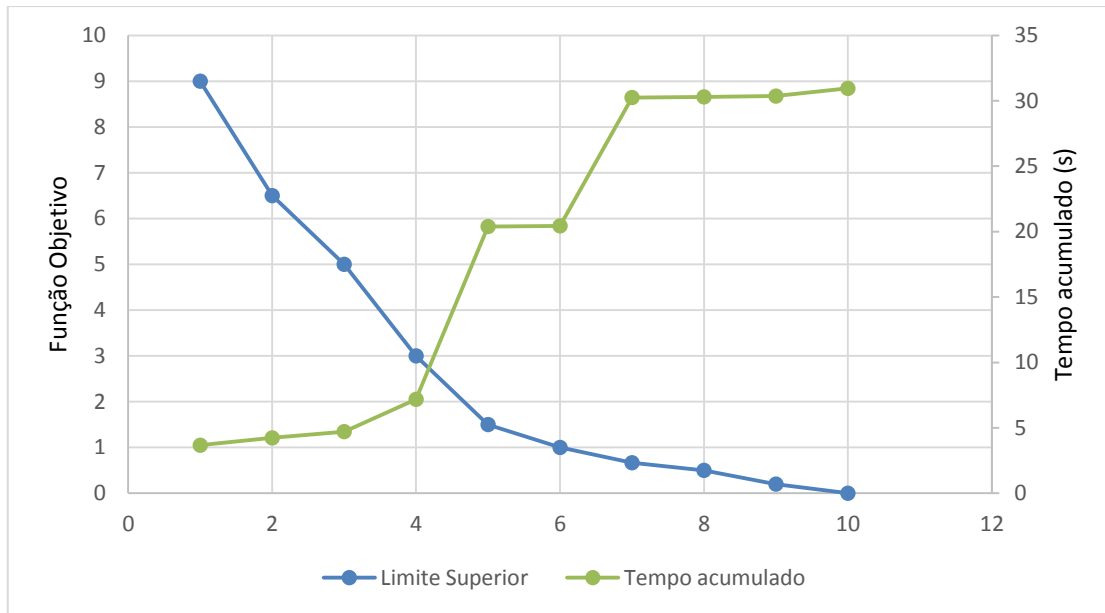


A instância com conjugados gerou um modelo de 28.222 variáveis e 55.848 restrições. O problema foi resolvido em 30,95 segundos (Figura 4.27) com o mesmo aumento de capacidade nos berços do caso anterior (Figura 4.28). Desta vez fica mais forte a evidência de que um simples aumento da quantidade de restrições pode causar uma grande diferença no tempo de processamento, bem como na qualidade da solução por conta da velocidade de convergência – tempo de processamento multiplicado por 6 como mostrado na Tabela 4.8.

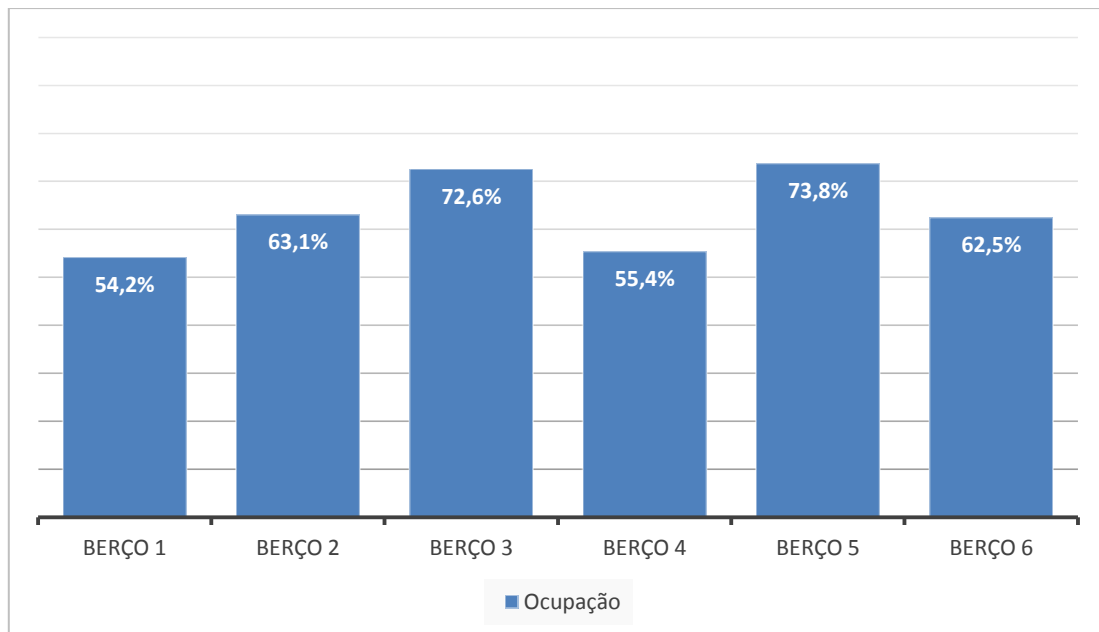
**Figura 4.26: Programação completa com aumento de capacidade e com clusters conjugados**



**Figura 4.27: Solução viável e tempo de processamento por solução encontrada no caso aumento de capacidade com conjugados**



**Figura 4.28: Taxa de ocupação dos berços no caso aumento de capacidade com conjugados**



## 5 Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas três formulações para o problema de alocação de berços e algumas variações desses modelos. Essas formulações que se dividem em dois grandes grupos modelam o problema com lógicas diferentes. No primeiro grupo a principal variável de decisão escolhe a posição que cada atracação vai ocupar num determinado berço o que leva a um modelo pautado por variáveis de ordenação. No segundo grupo, o que será decidido é a posição relativa de uma atracação com outra, gerando um modelo baseado em variáveis de sequenciamento.

Os experimentos com o modelo com variáveis de ordenação comprovam o quanto uma boa etapa de pré-processamento pode ser importante na eficiência da resolução do problema de programação mista. O algoritmo de redução de ordens, foi uma solução rápida, de fácil implementação e capaz de promover um aumento significativo de capacidade de processamento do modelo com a redução significativa do número de variáveis e, principalmente, do número de restrições.

A segunda formulação com variáveis de ordenação proposta apresentou uma forma mais compacta de modelar o problema seguindo a mesma lógica, porém com resultados pouco animadores. Entretanto é uma forma de trabalhar o problema que pode ser melhorada no futuro e servir de base para novas metodologias de resolução, sendo assim também uma contribuição válida.

Ficou claro após a experimentação que o modelo com variáveis de sequenciamento consegue ser ao mesmo tempo mais compacto, em termos de matriz do problema de programação inteira, e mais eficiente em tempo de processamento. A formulação final proposta se mostrou uma poderosa alternativa de uso prático por ser capaz de reduzir muitas horas ou até mesmo dias de trabalho manual para algumas horas, obedecendo todas as restrições e com soluções de boa qualidade.

Os resultados dos experimentos apontam que duas variáveis podem impactar o tempo de processamento. Como esperado de maneira intuitiva, o aumento do número de atracações aumenta a necessidade de processamento para resolver o problema de alocação. O nível de ociosidade, porém, se mostrou como determinante para a

velocidade de obtenção de soluções viáveis e ótimas. Os resultados das 95 instâncias de teste apontaram essa relação que foi novamente verificada nos casos realistas. Nenhum trabalho na bibliografia levantada chegou a fazer uma análise de como os dados são capazes de influenciar o comportamento dos modelos. O estudo feito nesse trabalho leva a crer que operadores portuários com maior nível de ociosidade podem se utilizar, com tranquilidade, de métodos exatos para o planejamento de suas operações. Em casos com maior nível de ocupação dos berços, ficou evidente que o tempo de processamento aumenta em muito e a qualidade da solução fica mais difícil de verificar por conta do comportamento do limitante dual do problema (não variou em nenhum dos casos estudados, permanecendo em zero).

A maior contribuição acadêmica deste trabalho foi o desenvolvimento de formulações para tratar o problema de alocação de berços para terminais dedicados com janelas de tempo de atracação. A literatura apesar de possuir bons e variados trabalhos a respeito da variante mais clássica do problema possui poucos trabalhos sobre casos mais gerais onde diversas restrições operacionais podem ser necessárias. Estão abertas, a partir desta dissertação, várias possibilidades de trabalho futuros que podem ser desenvolvidos para aperfeiçoar os métodos de resolução do BAP para terminais dedicados com janelas de atracação.

Além do citado acima, as aplicações do BAP em problemas reais do setor de petróleo e gás é muito escassa o que torna esse trabalho um ponto de partida para o desenvolvimento de novos modelos e práticas operacionais no gerenciamento de terminais portuários de apoio logístico. Apesar de não chegar em soluções comprovadamente ótimas para as instâncias realistas com maior taxa de utilização do porto, os modelos propostos são capazes de tornar o desafio de planejar as operações portuárias algo mais rápido e proveem ao tomador de decisão além de uma resposta mais ágil para parte de suas demandas a possibilidade de verificar alternativas de planejamento.



## 5.1 Trabalhos Futuros

Existem diversas linhas que podem ser seguidas como continuidade para este trabalho. Uma das dificuldades com relação a construção dos modelos foi a função objetivo. Por se tratar de um terminal dedicado com tarefas periódicas o que se espera de uma boa solução foge do usual, que seria minimizar o tempo de termino da atracação mais atrasada. A grande dificuldade em si é a construção de soluções que se aproximem ao máximo das metas operacionais, como o tempo entre saída de suprimentos para um mesmo *cluster*. Outras formas de modelar tanto função objetivo como o problema podem reduzir a simetria das soluções e acelerar o processo de otimização.

Outros métodos mais avançados podem ser utilizados como a utilização da relaxação lagrangeana em conjunto com o método de geração de linhas e colunas. Além disso, metaheurísticas podem ser utilizadas para conseguir soluções iniciais de boa qualidade, reduzindo também o tempo de processamento.

Um aspecto inerente ao problema que não foi considerado neste trabalho é a estocasticidade dos tempos de atracação. Como foi apresentado, os berços do porto possuem pouca ociosidade. Junte-se isso ao fato das atracações serem programadas pela média e está pronta a receita para a existência de muitos problemas derivados da aleatoriedade dos tempos de carregamento. A folga de segurança de cada atracação foi fixada de forma arbitrária em 2 horas. Estudar as distribuições dos tempos de carregamento e adicionar essa informação ao modelo de otimização pode dar a informação de o quanto essa folga pode estar subdimensionada e até mesmo propor programações diferentes capazes de minimizar o atraso das entregas no longo prazo.

## 6 Referências Bibliográficas

- AAS, B. et al. Routing of supply vessels to petroleum installations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 37, n. 2, p. 164–179, 2007.
- ABBAGNANO, N. **Dicionário de Filosofia**. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2007.
- ABPT. **Relatório anual 2011**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.abtp.org.br/downloads/RELATORIO-ANUAL-FINALIZADO.pdf>>.
- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2013**. Rio de Janeiro: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil), 2013.
- BASTOS, R. F. **Impacto do setor petróleo na infraestrutura portuária do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.
- BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 3, p. 615–627, maio 2010.
- BISPO, C. A. F. **Uma análise da nova geração de sistemas de apoio à decisão**. São Carlos: USP, 1998.
- CHEONG, C. Y. et al. Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports. **Annals of Operations Research**, v. 180, n. 1, p. 63–103, 13 dez. 2008.
- CORDEAU, J.-F. et al. Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem. **Transportation Science**, v. 39, n. 4, p. 526–538, nov. 2005.
- COSTA, L. **Soluções para o problema de otimização de itinerário de sondas**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.
- DE OLIVEIRA, R. M.; MAURI, G. R.; NOGUEIRA LORENA, L. A. Clustering Search for the Berth Allocation Problem. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 5, p. 5499–5505, abr. 2012.
- DUHAMEL, C.; CYNTHIA SANTOS, A.; MOREIRA GUEDES, L. Models and hybrid methods for the onshore wells maintenance problem. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 12, p. 2944–2953, dez. 2012.
- GOLIAS, M. et al. Robust berth scheduling at marine container terminals via hierarchical optimization. **Computers & Operations Research**, v. 41, p. 412–422, jan. 2014.

- HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K. **Robust supply vessel planning** Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). **Anais...**2011
- IMAI, A. et al. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 39, n. 3, p. 199–221, mar. 2005.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation with service priority. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 37, n. 5, p. 437–457, jun. 2003.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Marine container terminal configurations for efficient handling of mega-containerships. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 49, n. 1, p. 141–158, jan. 2013.
- JOSLIN, D. E.; CLEMENTS, D. P. “Squeaky wheel” optimization. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 10, p. 353–373, 1999.
- KARAFKA, J. et al. The berth allocation problem with stochastic vessel handling times. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, n. 1-4, p. 473–484, 13 maio 2012.
- LEITE, R. P. **Maritime transport of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvement points**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2012.
- LIM, A. The berth planning problem. **Operations Research Letters**, v. 22, n. April 1996, p. 105–110, 1998.
- MATTOS RIBEIRO, G.; DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J. A branch-price-and-cut algorithm for the workover rig routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 12, p. 3305–3315, dez. 2012.
- NISHIMURA, E.; IMAI, A.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 131, n. 2, p. 282–292, jun. 2001.
- PENGFEEI, Z.; HAIGUI, K.; LI, L. **A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration** World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Dalian: IEEE, 2006
- PETROBRAS. **Plano de Negócios e Gestão 2013 - 2017**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<http://investidorpetrobras.com.br/pt/destaques/plano-de-negocios-e-gestao-2013-2017.htm>>.
- ROBENEK, T. et al. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 2, p. 399–411, jun. 2014.

UGLANE, V. T.; FRIEDBERG, D. Ø. **Routing and Scheduling of Platform Supply Vessels In the Brazilian Oil Industry**. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2012.

UMANG, N.; BIERLAIRE, M.; VACCA, I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 54, p. 14–31, ago. 2013.

XU, D.; LI, C.-L.; LEUNG, J. Y.-T. Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 1, p. 47–56, jan. 2012.

YAN, S. et al. A network flow model for the dynamic and flexible berth allocation problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 81, p. 65–77, jan. 2015.

# Apêndice A

## Tabelas com resultados das 95 instâncias para os modelos de variáveis de ordenação e sequenciamento

Instância	Atracções	cpu (s)	Variáveis	Restrições	UB	LB	gap	Matriz
U10_S1_B3	26	7200	1167	24976	7	0	-	29146992
U10_S1_B4	26	11,029	1531	33271	0	0	0,00%	50937901
U10_S1_B5	26	14,742	1895	41566	0	0	0,00%	78767570
U10_S2_B3	29	7200	1300	31226	12	0	-	40593800
U10_S2_B4	29	393,247	1706	41601	0	0	0,00%	70971306
U10_S2_B5	29	13,307	2112	51976	0	0	0,00%	109773312
U10_S3_B4	32	7200	1881	50867	8	0	-	95680827
U10_S3_B5	32	61,886	2329	63556	0	0	0,00%	148021924
U10_S3_B6	32	135,081	2777	76245	0	0	0,00%	211732365
U10_S4_B4	35	7200	2056	61069	82	0	-	125557864
U10_S4_B5	35	814,372	2546	76306	0	0	0,00%	194275076
U10_S4_B6	35	49,312	3036	91543	0	0	0,00%	277924548
U10_S5_B4	38	7200	2231	72207	34	0	-	161093817
U10_S5_B5	38	1269,099	2763	90226	0	0	0,00%	249294438
U10_S5_B6	38	126,548	3295	108245	0	0	0,00%	356667275
U10_S6_B4	41	7200	2406	84281	304	0	-	202780086
U10_S6_B5	41	6171,338	2980	105316	0	0	0,00%	313841680
U10_S6_B6	41	5382,58	3554	126351	0	0	0,00%	449051454
U10_S7_B4	44	7200	2581	97291	na	0	na	251108071
U10_S7_B5	44	6649,277	3197	121576	0	0	0,00%	388678472
U10_S7_B6	44	6570,544	3813	145861	0	0	0,00%	556167993
U11_S1_B3	28	7200	1255	29077	6	0	-	36491635
U11_S1_B4	28	48,61	1647	38737	0	0	0,00%	63799839
U11_S1_B5	28	32,292	2039	48397	0	0	0,00%	98681483
U11_S2_B3	31	7200	1388	35795	116	0	-	49683460
U11_S2_B4	31	5634,023	1822	47691	0	0	0,00%	86893002
U11_S2_B5	31	39,421	2256	59587	0	0	0,00%	134428272
U11_S3_B4	34	1976,642	1997	57581	0	0	0,00%	114989257
U11_S3_B5	34	726,762	2473	71947	0	0	0,00%	177924931
U11_S3_B6	34	71,917	2949	86313	0	0	0,00%	254537037
U11_S4_B4	37	7200	2172	68407	114	0	-	148580004
U11_S4_B5	37	3656,133	2690	85477	0	0	0,00%	229933130
U11_S4_B6	37	184,143	3208	102547	0	0	0,00%	328970776

U11_S5_B4	40	7200	2907	100177	62	0	-	291214539
U11_S5_B5	40	7200	3467	120185	12	0	-	416681395
U11_S6_B4	43	7200	2522	92867	na	0	na	234210574
U11_S6_B5	43	7200	3124	116047	63	0	-	362530828
U11_S6_B6	43	7200	3726	139227	13	0	-	518759802
U11_S7_B5	46	7200	3341	133087	100	0	-	444643667
U11_S7_B6	46	5676,44	3985	159673	0	0	0,00%	636296905
U11_S7_B7	46	2181,502	4629	186259	0	0	0,00%	862192911
U12_S1_B3	30	7200	1347	33492	40	0	-	45113724
U12_S1_B4	30	1713,016	1767	44621	0	0	0,00%	78845307
U12_S1_B5	30	53,867	2187	55750	0	0	0,00%	121925250
U12_S2_B4	33	7200	1942	54199	10	0	-	105254458
U12_S2_B5	33	252,862	2404	67720	0	0	0,00%	162798880
U12_S2_B6	33	84,49	2866	81241	0	0	0,00%	232836706
U12_S3_B3	36	7200	1613	48566	374	0	-	78336958
U12_S3_B4	36	6571,058	2117	64713	0	0	0,00%	136997421
U12_S3_B5	36	108,655	2621	80860	0	0	0,00%	211934060
U12_S4_B4	39	7200	2292	76163	288	0	-	174565596
U12_S4_B5	39	7200	2838	95170	4	0	-	270092460
U12_S4_B6	39	231,24	3384	114177	0	0	0,00%	386374968
U12_S5_B4	42	7200	2467	88549	na	0	na	218450383
U12_S5_B5	42	7200	3055	110650	39	0	-	338035750
U12_S6_B5	45	7200	3272	127300	35	0	-	416525600
U12_S6_B6	45	7200	3902	152729	4	0	-	595948558
U12_S6_B7	45	484,961	4532	178158	0	0	0,00%	807412056
U12_S7_B5	48	7200	3489	145120	148	0	-	506323680
U12_S7_B6	48	7200	4161	174111	4	0	-	724475871
U12_S7_B7	48	2068,214	4833	203102	0	0	0,00%	981591966
U13_S1_B3	32	7200	1435	38217	120	0	-	54841395
U13_S1_B4	32	7200	1883	50919	2	0	-	95880477
U13_S1_B5	32	85,66	2331	63621	0	0	0,00%	148300551
U13_S2_B4	35	7200	2058	61121	62	0	-	125787018
U13_S2_B5	35	625,221	2548	76371	0	0	0,00%	194593308
U13_S2_B6	35	70,7	3038	91621	0	0	0,00%	278344598
U13_S3_B4	38	7200	2233	72259	211	0	-	161354347
U13_S3_B5	38	7200	2765	90291	6	0	-	249654615
U13_S3_B6	38	856,383	3297	108323	0	0	0,00%	357140931
U13_S4_B4	41	7200	2408	84333	223	0	-	203073864
U13_S4_B5	41	7200	2982	105381	41	0	-	314246142
U13_S4_B6	41	7200	3556	126429	6	0	-	449581524
U13_S5_B4	44	7200	2583	97343	na	0	na	251436969
U13_S5_B5	44	7200	3199	121641	91	0	-	389129559

U13_S5_B6	44	1376,038	3815	145939	0	0	0,00%	556757285
U13_S6_B5	47	7200	3416	139071	273	0	-	475066536
U13_S6_B6	47	7200	4074	166853	85	0	-	679759122
U13_S6_B7	47	155,268	4732	194635	0	0	0,00%	921012820
U13_S7_B5	50	7200	3633	157671	na	0	na	572818743
U13_S7_B6	50	7200	4333	189171	107	0	-	819677943
U13_S7_B7	50	6033,651	5033	220671	0	0	0,00%	1110637143
U14_S1_B3	34	7200	1527	43256	80	0	-	66051912
U14_S1_B4	34	749,631	2003	57635	0	0	0,00%	115442905
U14_S1_B5	34	141,181	2479	72014	0	0	0,00%	178522706
U14_S2_B4	37	7200	2178	68461	30	0	-	149108058
U14_S2_B5	37	287,431	2696	85544	0	0	0,00%	230626624
U14_S2_B6	37	167,046	3214	102627	0	0	0,00%	329843178
U14_S3_B4	40	7200	2353	80223	100	0	-	188764719
U14_S3_B5	40	7200	2913	100244	76	0	-	292010772
U14_S3_B6	40	7200	3473	120265	14	0	-	417680345
U14_S4_B4	43	7200	2528	92921	na	0	na	234904288
U14_S4_B5	43	7200	3130	116114	26	0	-	363436820
U14_S4_B6	43	1962,181	3732	139307	0	0	0,00%	519893724
U14_S5_B4	46	7200	2703	106555	183	0	-	288018165

<b>Instância</b>	<b>Atracções</b>	<b>cpu (s)</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Restrições</b>	<b>UB</b>	<b>LB</b>	<b>gap</b>	<b>Matriz</b>
U10_S1_B3	26	236,4	2103	3977	0	0	0,00%	8363631
U10_S1_B4	26	0,7	2779	5277	0	0	0,00%	14664783
U10_S1_B5	26	1,1	3455	6577	0	0	0,00%	22723535
U10_S2_B3	29	1491,4	2605	4957	0	0	0,00%	12912985
U10_S2_B4	29	1	3446	6581	0	0	0,00%	22678126
U10_S2_B5	29	1,7	4287	8205	0	0	0,00%	35174835
U10_S3_B4	32	2,5	4185	8029	0	0	0,00%	33601365
U10_S3_B5	32	2,3	5209	10013	0	0	0,00%	52157717
U10_S3_B6	32	3,4	6233	11997	0	0	0,00%	74777301
U10_S4_B4	35	103,6	4996	9621	0	0	0,00%	48066516
U10_S4_B5	35	3,6	6221	12001	0	0	0,00%	74658221
U10_S4_B6	35	3,9	7446	14381	0	0	0,00%	107080926
U10_S5_B4	38	170,7	5879	11357	0	0	0,00%	66767803
U10_S5_B5	38	6,7	7323	14169	0	0	0,00%	103759587
U10_S5_B6	38	4,7	8767	16981	0	0	0,00%	148872427
U10_S6_B4	41	7200	6834	13237	82	0	-	90461658
U10_S6_B5	41	77,9	8515	16517	0	0	0,00%	140642255
U10_S6_B6	41	6,1	10196	19797	0	0	0,00%	201850212

U10_S7_B4	44	7200	7861	15261	263	0	-	119966721
U10_S7_B5	44	148,3	3963	19045	0	0	0,00%	75475335
U10_S7_B6	44	14,5	11733	22829	0	0	0,00%	267852657
U11_S1_B3	28	68,8	2341	4618	0	0	0,00%	10810738
U11_S1_B4	28	1,5	3215	6130	0	0	0,00%	19707950
U11_S1_B5	28	1,7	3999	7642	0	0	0,00%	30560358
U11_S2_B3	31	1415,9	2969	5670	0	0	0,00%	16834230
U11_S2_B4	31	2,3	3930	7530	0	0	0,00%	29592900
U11_S2_B5	31	2,1	4891	9390	0	0	0,00%	45926490
U11_S3_B4	34	147,3	4717	9074	0	0	0,00%	42802058
U11_S3_B5	34	2,8	5873	11318	0	0	0,00%	66470614
U11_S3_B6	34	4,3	7029	13562	0	0	0,00%	95327298
U11_S4_B4	37	7200	5576	10762	22	0	-	60008912
U11_S4_B5	37	8,9	6945	13426	0	0	0,00%	93243570
U11_S4_B6	37	4,7	8314	16090	0	0	0,00%	133772260
U11_S5_B4	40	30,7	9707	18834	0	0	0,00%	182821638
U11_S5_B5	40	7,5	11307	21954	0	0	0,00%	248233878
U11_S6_B4	43	7200	7510	14570	260	0	-	109420700
U11_S6_B5	43	606,2	9359	18182	0	0	0,00%	170165338
U11_S6_B6	43	16,4	11208	21794	0	0	0,00%	244267152
U11_S7_B5	46	7200	10701	20830	6	0	-	222901830
U11_S7_B6	46	62,1	12817	24970	0	0	0,00%	320040490
U11_S7_B7	46	11,5	14933	28110	0	0	0,00%	419766630
U12_S1_B3	30	7200	2787	5309	4	0	-	14796183
U12_S1_B4	30	1,4	3687	7049	0	0	0,00%	25989663
U12_S1_B5	30	1,8	4587	8789	0	0	0,00%	40315143
U12_S2_B4	33	5,2	4450	8545	0	0	0,00%	38025250
U12_S2_B5	33	4,3	5539	10657	0	0	0,00%	59029123
U12_S2_B6	33	3,6	6628	12796	0	0	0,00%	84811888
U12_S3_B3	36	7200	3989	7665	126	0	-	30575685
U12_S3_B4	36	104	5285	10185	0	0	0,00%	53827725
U12_S3_B5	36	3,8	6581	12705	0	0	0,00%	83611605
U12_S4_B4	39	7200	6192	11969	40	0	-	74112048
U12_S4_B5	39	7,6	7713	14933	0	0	0,00%	115178229
U12_S4_B6	39	7	9234	17897	0	0	0,00%	165260898
U12_S5_B4	42	7200	7171	13897	150	0	-	99655387
U12_S5_B5	42	265,2	8935	17341	0	0	0,00%	154941835
U12_S6_B5	45	7200	10247	19929	19	0	-	204212463
U12_S6_B6	45	15,2	12272	23889	0	0	0,00%	293165808
U12_S6_B7	45	12,5	14297	27849	0	0	0,00%	398157153
U12_S7_B5	48	7200	11649	22697	57	0	-	264397353
U12_S7_B6	48	20,6	13953	27209	0	0	0,00%	379647177



U12_S7_B7	48	21,6	16257	31721	0	0	0,00%	515688297
U13_S1_B3	32	7200	3163	6046	42	0	-	19123498
U13_S1_B4	32	1,7	4187	8030	0	0	0,00%	33621610
U13_S1_B5	32	2,4	5211	10014	0	0	0,00%	52182954
U13_S2_B4	35	256,9	4998	9622	0	0	0,00%	48090756
U13_S2_B5	35	4,3	6223	12002	0	0	0,00%	74688446
U13_S2_B6	35	3,9	7448	14382	0	0	0,00%	107117136
U13_S3_B4	38	7200	5881	11358	40	0	-	66796398
U13_S3_B5	38	11	7455	14170	0	0	0,00%	105637350
U13_S3_B6	38	6	8769	16982	0	0	0,00%	148915158
U13_S4_B4	41	7200	6836	13238	88	0	-	90494968
U13_S4_B5	41	9,3	8517	16518	0	0	0,00%	140683806
U13_S4_B6	41	7,4	10198	19798	0	0	0,00%	201900004
U13_S5_B4	44	7200	7863	15262	191	0	-	120005106
U13_S5_B5	44	825,9	9799	19046	0	0	0,00%	186631754
U13_S5_B6	44	16	11735	22830	0	0	0,00%	267910050
U13_S6_B5	47	7200	11171	21754	23	0	-	243013934
U13_S6_B6	47	18,1	13380	26078	0	0	0,00%	348923640
U13_S6_B7	47	13,7	15589	30402	0	0	0,00%	473936778
U13_S7_B5	50	7200	12633	24642	132	0	-	311302386
U13_S7_B6	50	219,4	15133	29542	0	0	0,00%	447059086
U13_S7_B7	50	18,8	17633	34442	0	0	0,00%	607315786
U14_S1_B3	34	7200	3567	6833	16	0	-	24373311
U14_S1_B4	34	2,6	4723	9077	0	0	0,00%	42870671
U14_S1_B5	34	2,8	5879	11321	0	0	0,00%	66556159
U14_S2_B4	37	119,5	5582	10765	0	0	0,00%	60090230
U14_S2_B5	37	6,4	6951	13429	0	0	0,00%	93344979
U14_S2_B6	37	4,4	8320	16093	0	0	0,00%	133893760
U14_S3_B4	40	7200	6513	12597	40	0	-	82044261
U14_S3_B5	40	8,3	8113	15717	0	0	0,00%	127512021
U14_S3_B6	40	6,5	9713	18837	0	0	0,00%	182963781
U14_S4_B4	43	7200	7516	14573	271	0	-	109530668
U14_S4_B5	43	7200	9365	18185	4	0	-	170302525
U14_S4_B6	43	17,2	11214	21797	0	0	0,00%	244431558
U14_S5_B4	46	7200	8591	16693	114	0	-	143409563

# Apêndice B

## Tabela de resultados do modelo completo em situações realistas

SEM CONJUGADOS		
Atracção	Inicio	Termino
BOMBEIO	129	167
Embarcações especiais_1	68	80
Embarcações especiais_2	154	166
Fluidos		100
MANUTENCAO_1	57	67
MANUTENCAO_2	57	67
SERVIÇO_EXTRA_1	2	9
SERVIÇO_EXTRA_2	26	33
SERVIÇO_EXTRA_3	50	57
SERVIÇO_EXTRA_4	74	81
SERVIÇO_EXTRA_5	98	105
SERVIÇO_EXTRA_6	122	129
SERVIÇO_EXTRA_7	146	153
Tubos_1	38	52
Tubos_2	122	136
CSS 1_1	23	37
CSS 1_2	81	95
CSS 1_3	136	150
CSS 2_1	31	45
CSS 2_2	87	101
CSS 2_3	139	153
CSS 3_1	53	67
CSS 3_2	105	119
CSS 3_3	161	175
Troca_Turma_1	10	18
Troca_Turma_2	34	42
Troca_Turma_3	58	66
Troca_Turma_4	82	90
CPP 1_1	7	21
CPP 1_2	91	105
CPP 2_1	40	54
CPP 2_2	124	138
CPP 3_1	70	84
CPP 3_2	150	164
CPP 4_1	36	50

CPP 4_2	119	133
CPP10_1	19	33
CPP10_2	106	120
CPP11_1	43	57
CPP11_2	130	144
CPP12_1	76	92
CPP12_2	156	172
CPP13_1	20	35
CPP13_2	108	123
CPP5_1	7	20
CPP5_2	95	108
CPP6_1	60	73
CPP6_2	144	157
CPP7_1	15	28
CPP7_2	103	116
CPP8_1		16
CPP8_2	84	100
CPP9_1	67	78
CPP9_2	153	164

COM CONJUGADOS		
Atracação	Início	Término
Embarcações especiais_1	42	54
Embarcações especiais_2	121,25	133,25
MANUTENCAO_1	57	67
MANUTENCAO_2	57	67
Tubos_1	68	82
Tubos_2	153,25	167,25
CSS 1_1	9	23
CSS 1_2	68	82
CSS 1_3	124	138
CSS 2_1	25	39
CSS 2_2	85	99
CSS 2_3	136,25	150,25
CSS 3_1	56,5	70,5
CSS 3_2	107,75	121,75
CSS 3_3	159	173
CPP1_1	2,25	16,25
CPP1_2	91	105
CPP2_1	39,5	53,5
CPP2_2	128,25	142,25
CPP3_1	8	22
CPP3_2	87,5	101,5
CPP4_1	80,25	94,25
CPP4_2	160	174
CPP5_1	45,25	58,25
CPP5_2	130	143
CPP6_1	16	29
CPP6_2	104,5	117,5
CPP7_1	33,25	46,25
CPP7_2	112,5	125,5
CPP8_1	61,25	77,25
CPP8_2	145,25	161,25
CPP9_1	19,25	30,25
CPP9_2	108	119
CPP10_1	70,5	84,5
CPP10_2	149,75	163,75
CPP11_1	39,75	53,75
CPP11_2	128,5	142,5
CPP12_1	85	101
CPP12_2	165	181
CPP13_1	21,5	36,5
CPP13_2	102	117
SERVIÇO_EXTRA_1	2	9

SERVIÇO_EXTRA_2	26	33
SERVIÇO_EXTRA_3	50	57
SERVIÇO_EXTRA_4	74	81
SERVIÇO_EXTRA_5	98	105
SERVIÇO_EXTRA_6	122	129
SERVIÇO_EXTRA_7	146	153
Troca_Turma_1	10	18
Troca_Turma_2	34	42
Troca_Turma_3	58	66
Troca_Turma_4	82	90
BOMBEIO	129	167
Fluidos	0	100

BERÇO EXTRA SEM CONJUGADOS		
Atracação	Início	Término
Embarcações especiais_1	46	58
Embarcações especiais_2	130	142
MANUTENCAO_1	57	67
MANUTENCAO_2	57	67
Tubos_1	71	85
Tubos_2	155	169
CSS 1_1	21	35
CSS 1_2	77	91
CSS 1_3	133	147
CSS 2_1	21	35
CSS 2_2	77	91
CSS 2_3	133	147
CSS 3_1	38	52
CSS 3_2	94	108
CSS 3_3	150	164
CPP1_1	69	83
CPP1_2	153	167
CPP2_1	40	54
CPP2_2	124	138
CPP3_1	27	41
CPP3_2	111	125
CPP4_1	4	18
CPP4_2	88	102
CPP5_1	10	23
CPP5_2	94	107
CPP6_1	29	42
CPP6_2	113	126
CPP7_1	61	74

CPP7_2	145	158
CPP8_1	52	68
CPP8_2	136	152
CPP9_1	82	93
CPP9_2	166	177
CPP10_1	52	66
CPP10_2	136	150
CPP11_1	10	24
CPP11_2	94	108
CPP12_1	10	26
CPP12_2	94	110
CPP13_1	34	49
CPP13_2	118	133
SERVIÇO_EXTRA_1	2	9
SERVIÇO_EXTRA_2	26	33
SERVIÇO_EXTRA_3	50	57
SERVIÇO_EXTRA_4	74	81
SERVIÇO_EXTRA_5	98	105
SERVIÇO_EXTRA_6	122	129
SERVIÇO_EXTRA_7	146	153
Troca_Turma_1	7	15
Troca_Turma_2	31	39
Troca_Turma_3	58	66
Troca_Turma_4	79	87

BERÇO EXTRA SEM CONJUGADOS		
Atracção	Início	Término
Embarcações especiais_1	0	12
Embarcações especiais_2	84	96
MANUTENCAO_1	57	67
MANUTENCAO_2	57	67
Tubos_1	4	18
Tubos_2	88	102
CSS 1_1	38	52
CSS 1_2	94	108
CSS 1_3	150	164
CSS 2_1	2	16
CSS 2_2	58	72
CSS 2_3	114	128
CSS 3_1	19	33
CSS 3_2	75	89
CSS 3_3	131	145

CPP1_1	38	52
CPP1_2	122	136
CPP2_1	80	94
CPP2_2	164	178
CPP3_1	22	36
CPP3_2	106	120
CPP4_1	8	22
CPP4_2	92	106
CPP5_1	64	77
CPP5_2	148	161
CPP6_1	27	40
CPP6_2	111	124
CPP7_1	22	35
CPP7_2	106	119
CPP8_1	69	85
CPP8_2	153	169
CPP9_1	43	54
CPP9_2	127	138
CPP10_1	64	78
CPP10_2	148	162
CPP11_1	39	53
CPP11_2	123	137
CPP12_1	43	59
CPP12_2	127	143
CPP13_1	70	85
CPP13_2	154	169
SERVIÇO_EXTRA_1	2	9
SERVIÇO_EXTRA_2	26	33
SERVIÇO_EXTRA_3	50	57
SERVIÇO_EXTRA_4	74	81
SERVIÇO_EXTRA_5	98	105
SERVIÇO_EXTRA_6	122	129
SERVIÇO_EXTRA_7	146	153
Troca_Turma_1	10	18
Troca_Turma_2	34	42
Troca_Turma_3	55	63
Troca_Turma_4	82	90





