

## SIMULAÇÃO DO SUPRIMENTO DE FLUIDOS PARA SONDAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO OFFSHORE

Rafael Pedro Longhi

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

Abril de 2017

SIMULAÇÃO DO SUPRIMENTO DE FLUIDOS PARA SONDAS DE  
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO OFFSHORE

Rafael Pedro Longhi

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 José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

---

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

---

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2017

Longhi, Rafael Pedro

Simulação do suprimento de fluidos para sondas de perfuração de poços de petróleo offshore / Rafael Pedro Longhi. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

X, 80 p.: il.,; 29,7cm

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho.

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

Referências Bibliográficas: p. 57-59.

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

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente aos meus pais, pela dedicação e incentivo providos ao longo de todos os anos. Também agradeço ao meu melhor amigo, meu cachorro Luan, que esteve ao meu lado em todos os momentos da confecção deste trabalho.

Agradeço, também, ao meu professor e orientador Virgílio. Graças ao seu incentivo, tive o meu primeiro contato com a Pesquisa Operacional e fui motivado a ingressar no mestrado. Agradeço a todos os professores da PO, em especial, ao Professor Edilson e à Professora Laura. Agradeço também ao Professor Glaydston, cujos ensinamentos de simulação ao longo da disciplina ministrada foram muito importantes.

Agradeço também aos meus amigos mais antigos, que me acompanham desde o colégio ou graduação e a todos os amigos que fiz no LORDE. Este trabalho só foi possível graças ao apoio e conselhos de todos. Agradeço, também, ao suporte recebido no LORDE, em especial, agradeço ao Seu Zé e à Soyla, que sempre ajudaram a todos os alunos com seu trabalho valioso.

Agradeço também a todos os meus amigos da Escola Modelo de Língua Japonesa do Estado do Rio de Janeiro. Por mais que os ensinamentos não estejam diretamente ligados a este trabalho, me ajudaram muito a me engrandecer culturalmente e não poderia esquecê-los. Agradeço em especial à Professora Rika Hagino, cujo ensinamento foi bastante valioso. Agradeço também à Fundação Japão pelo intercâmbio de duas semanas no Japão para treinamento do idioma.

Agradeço também à HITACHI pela cooperação no projeto de pesquisa IPANEMA e auxílio financeiro ao longo deste projeto. Este trabalho não teria sido possível sem as discussões e ideias surgidas ao longo do projeto.

Agradeço à Petrobras pela possibilidade de cooperação nos Projetos de pesquisa PLACAR, INEES e PROBARCOS. A minha linha de pesquisa, desde o final de minha graduação, foi moldada a partir destes projetos. Eles me ajudaram a entender melhor a pesquisa operacional e me deram motivação para seguir em minha pesquisa.

Por fim, agradeço, também, a CAPES pelo auxílio financeiro. O financiamento foi muito importante para viabilizar a elaboração deste trabalho.

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

## SIMULAÇÃO DO SUPRIMENTO DE FLUIDOS PARA SONDAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO OFFSHORE

Rafael Pedro Longhi

Abril/2017

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Os custos envolvidos na indústria do petróleo são usualmente elevados, sobretudo os referentes à fase de perfuração, por isso torna-se necessário otimizar ao máximo as operações. Uma das formas de conseguir estes resultados é através de melhorias na logística e na cadeia de suprimentos. Este trabalho realiza uma análise da cadeia de suprimentos durante a fase de exploração *offshore* de óleo e gás, tendo como foco o suprimento de fluidos utilizados ao longo da perfuração. Foi desenvolvido um modelo de simulação, englobando tanto o gerenciamento do estoque nas unidades marítimas quanto a programação de rotas de embarcações que realizam o transporte destes fluidos até as sondas. Para a experimentação, foi desenvolvida uma metodologia para a geração de instâncias, com o objetivo de obter demandas estocásticas, mas que sejam realistas. Ao final, os resultados são avaliados, buscando-se determinar o tamanho da frota ideal. Busca-se dimensionar a operação otimizando custos, mas mantendo um bom nível de serviço sem faltas de produtos.

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

## OFFSHORE OIL WELLS FLUIDS SUPPLY SIMULATION

Rafael Pedro Longhi

April/2017

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

Costs on Oil & Gas industry are usually large, especially during drilling phase. Therefore, it is necessary to optimize operations. One way to achieve this objective is through improvements on logistics and supply chain. This work makes an analysis on supply chain during offshore oil & gas exploration phase, focusing on drilling fluids supply. We show a simulation model developed, which considers inventory management on maritime units and routing planning for platform supply vessel routes. During experiments, we propose a data generation method, making possible generation of stochastic demands with realistic values. On the end, this work shows results analysis, determining some parameters, for example, fleet size. The objective is to obtain an operation with lowest costs, but maintaining a good service level, without shortages.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO DO TEMA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3</b>	<b>ESTRUTURA.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>LOGÍSTICA OFFSHORE .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>LOGÍSTICA OFFSHORE ABORDADA POR SIMULAÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.1</b>	<b>LÓGICA DA SIMULAÇÃO DE ESTOQUES.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.2</b>	<b>LÓGICA DA SIMULAÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO DE EMBARCAÇÕES .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTAÇÕES.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>CRIAÇÃO DAS INSTÂNCIAS.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2</b>	<b>PLANO DE EXPERIMENTOS.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>6.1</b>	<b>VALIDAÇÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
<b>7.2</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>60</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>67</b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTIMATIVAS DE PRODUÇÃO DA PRINCIPAL COMPANHIA PETROLÍFERA BRASILEIRA. FONTE: PETROBRAS (2016).....	2
FIGURA 2. REGIÃO DO PRÉ-SAL SEGUNDO ANP. FONTE: ANP (2017).....	3
FIGURA 3. PERSPECTIVAS DE DIMINUIÇÃO DO CUSTO DE EXTRAÇÃO. FONTE: PETROBRAS (2016).....	4
FIGURA 4. PRODUTOS DEMANDADOS POR SONDAS E SUAS PERCENTAGENS DE ÁREA DE DECK DEMANDADAS. ....	4
FIGURA 5. SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES REALIZADA AO LONGO DAS FASES DA CONSTRUÇÃO DE UM POÇO. ....	15
FIGURA 6. SISTEMA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO. ....	16
FIGURA 7. PADRÃO DE DEMANDAS DE FLUIDOS AO LONGO DA PERFURAÇÃO.....	17
FIGURA 8. EMBARCAÇÕES DO TIPO PSV ANCORADAS NO PORTO DE MACAÉ. FONTE: ACERVO PESSOAL DO AUTOR. ....	18
FIGURA 9. LÓGICA DA SIMULAÇÃO PARA CADA POÇO $w$ NO PLANEJAMENTO DO DIA $i$ PARA O DIA $j$ .....	23
FIGURA 10. LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO DE VIAGENS PARA O PORTO PARA CADA UM DOS BARCOS. ....	25
FIGURA 11. LÓGICA DE ESCOLHA DO BARCO .....	26
FIGURA 12. CARACTERÍSTICAS DE UMA DISTRIBUIÇÃO TRIANGULAR. ....	29
FIGURA 13. CASOS CONSIDERADOS PARA A RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES.....	30
FIGURA 14. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA MATRIZ DE DEMANDAS UTILIZADA PARA OS TESTES.....	33
FIGURA 15. LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS E PORTO CONSIDERADOS NOS EXPERIMENTOS .....	34
FIGURA 16. PARTE 1 DA INTERFACE DO PROGRAMA DESENVOLVIDO. ....	37
FIGURA 17. PARTE 2 DA INTERFACE DO PROGRAMA DESENVOLVIDO. ....	38
FIGURA 18. DISCREPÂNCIA ENTRE O VALOR SIMULADO E O REAL PARA O P10 .....	40
FIGURA 19. DISCREPÂNCIA ENTRE O VALOR SIMULADO E O REAL PARA O PERCENTIL 2... ..	41
FIGURA 20. DISCREPÂNCIA ENTRE OS VALORES SIMULADOS E OS REAIS PARA A MÉDIA. .	41
FIGURA 21. MÉDIA DO NÚMERO DE BARCOS EM ATIVIDADE A CADA DIA PARA CADA CENÁRIO. ....	42
FIGURA 22. ANÁLISE DO NÚMERO DE BARCOS EM ATIVIDADE A PARTIR DA MÉDIA MÓVEL. ....	43
FIGURA 23. NÍVEIS DE ESTOQUE POR DIA PARA A SONDA QUE ABASTECE O POÇO 25. ....	44
FIGURA 24. ROTAS PERCORRIDAS PELO BARCO 1 DESDE O DIA 84 ATÉ O DIA 89. ....	45
FIGURA 25. ROTA PERCORRIDA PELO BARCO 1 DESDE O DIA 89 ATÉ O DIA 112.....	45
FIGURA 26. NÍVEL DE ESTOQUE POR DIA PARA O CASO DE UMA SONDA COM FALTA DE PRODUTOS. ....	46
FIGURA 27. NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO PARA CADA UM DOS CENÁRIOS. ....	48
FIGURA 28. TAXA DE UTILIZAÇÃO DA FROTA PARA CADA UM DOS CENÁRIOS.....	48
FIGURA 29. MAIOR FALTA REGISTRADA PARA CADA UM DOS CENÁRIOS.....	49
FIGURA 30. MÉDIA DOS TEMPOS COMPUTACIONAIS EXIGIDOS PARA CADA CENÁRIO. ....	51
FIGURA 31. TEMPOS COMPUTACIONAIS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE EXPERIMENTOS PROCESSADOS EM PARALELO. ....	52



# LISTA DE TABELAS

TABELA 1. DADOS DOS POÇOS CONSIDERADOS NOS EXPERIMENTOS.....	35
TABELA 2. CONSUMO DE FLUIDOS CONSIDERADO EM CADA FASE.....	36
TABELA 3. PLANO DE EXPERIMENTOS.....	39
TABELA 4. ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE FALTAS DE PRODUTOS NOS EXPERIMENTOS. ....	47
TABELA 5. TEMPO COMPUTACIONAL EXIGIDO EM CADA UM DOS EXPERIMENTOS (EM SEGUNDOS).....	50
TABELA 6. TEMPO COMPUTACIONAL EXIGIDO PARA GERAÇÃO DA INSTÂNCIA ALEATÓRIA. .....	50

# LISTA DE SIGLAS

PSV	<i>Platform Supply Vessel</i> (Embarcações de apoio)
LGN	Gás natural liquefeito
bbl	Barris de petróleo (unidade de medida)
boe	Barris de óleo equivalente

# 1 Introdução

Ao longo de um projeto de exploração de petróleo *offshore*, vários produtos são demandados e, para suprir estes produtos, é necessária a criação de uma cadeia de suprimentos, cuja logística apresenta custos. Este trabalho busca analisar esta cadeia, tentando buscar formas de diminuir estes custos. Em especial, dentre os produtos envolvidos na cadeia de suprimentos, a análise terá como foco fluidos de perfuração.

Pretende-se utilizar ferramentas da pesquisa operacional durante a análise, em específico a simulação. Após experimentações, espera-se ser possível obter uma análise do comportamento das operações, propondo-se formas de realizar a operação com menores custos ao mesmo tempo em que se garanta confiabilidade.

## 1.1 Justificativa e motivação do tema

Em 2015, foram produzidos 890 milhões de barris de petróleo no Brasil (ANP, 2016). Deste total, 93,4% foi obtido a partir de poços *offshore*, a maioria destes localizados nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo (ANP, 2016). No futuro, a principal companhia petrolífera brasileira pretende aumentar a sua produção de óleo e LGN de 2,07 milhões de barris de óleo equivalente por dia em 2017 para 2,77 milhões de barris de óleo equivalente por dia em 2021, além de aumentos também na produção de gás natural e produção de óleo e gás no exterior (PETROBRAS, 2016), conforme apresentado na Figura 1. Grande parte desse crescimento será devido à entrada em operação de novas unidades de produção na região do Pré-sal, por exemplo, onde o principal campo passará de 1 unidade de produção em 2017 para 6 em 2021 (PETROBRAS, 2016).

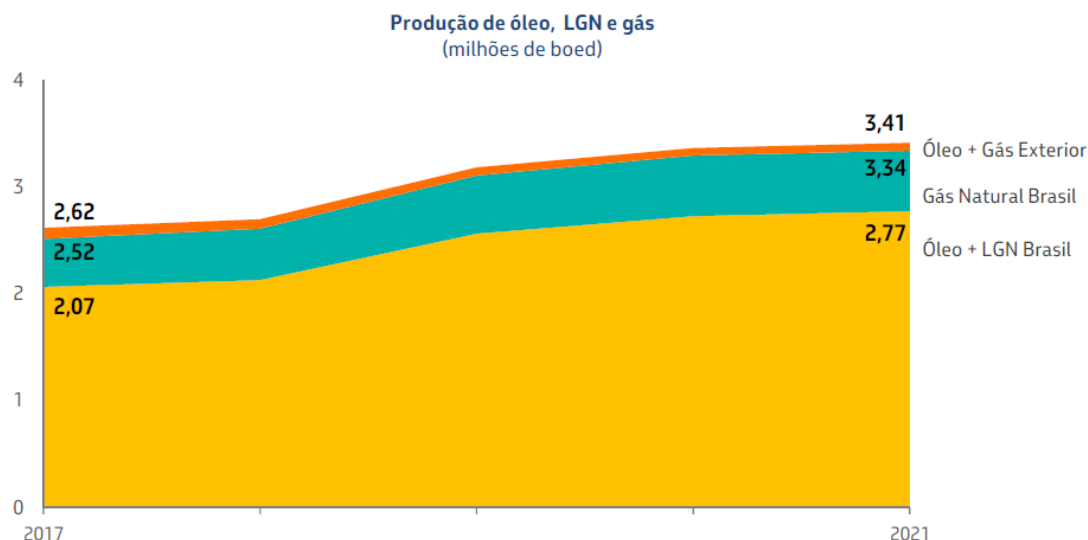


Figura 1. Estimativas de produção da principal companhia petrolífera brasileira. Fonte: PETROBRAS (2016)

Como a atividade petrolífera brasileira concentra-se em ambiente *offshore*, a logística de entrega de equipamentos e suprimentos precisa ser realizada por meio de embarcações. A operação é bastante robusta. Por exemplo, apenas na Bacia de Campos, são transportadas 650 toneladas de carga de *deck* por ano (LEITE, 2012).

No futuro, com a expansão da produção para unidades mais distantes da costa, como na região do Pré-Sal, o panorama pode se tornar ainda mais complexo. Na Figura 2, é apresentado um mapa oficial da ANP onde destaca-se com uma linha amarela a região onde localiza-se o Pré-sal de acordo com a interpretação da agência. Algumas áreas do Pré-sal compreendem regiões ainda mais distantes do que os atuais campos em produção, com poços que podem estar até a 300 Km da costa, o dobro do que ocorre na Bacia de Campos (UGLANE *et al.*, 2012), resultando em maiores tempos de viagem. Por este motivo, evidencia-se a importância do estudo da logística *offshore*.

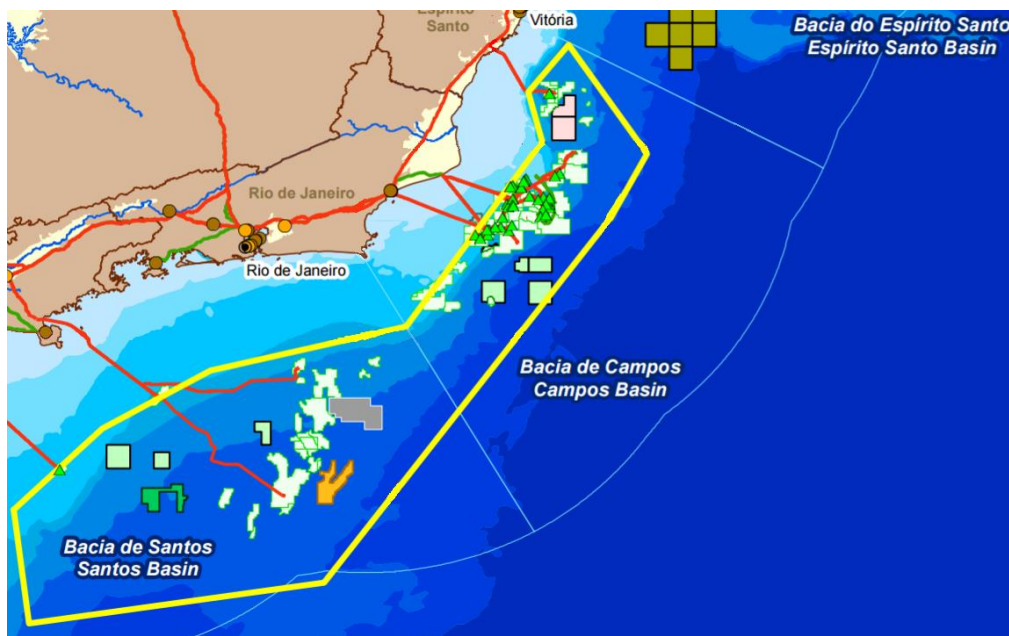


Figura 2. Região do Pré-sal segundo ANP. Fonte: ANP (2017)

Um projeto *offshore* de óleo & gás passa por diversas fases ao longo de sua vida, como, por exemplo, a perfuração e a produção. Paradas devido a faltas resultam em altos custos, entretanto, em particular, problemas ocorridos na fase de perfuração causam perdas até maiores do que as ocorridas durante a produção, devido aos altos custos relacionados ao aluguel de sondas de perfuração. No passado, contratos de curta duração já tiveram picos entre US\$600.000 e US\$700.000 por dia (SKONNORD & EVANS, 2016). Além disso, a fase da perfuração é a que apresenta mais flutuações e incertezas na demanda (AAS *et al.*, 2008). Um estudo acadêmico que proponha formas de evitar paradas na perfuração lidando-se com as incertezas pode ter como resultados uma grande economia financeira. Por este motivo, será dado foco à fase de perfuração.

Entretanto, devido à crise no mercado de óleo & gás graças aos menores preços do petróleo, estes contratos de aluguel são menores atualmente. Elas variam hoje em dia entre US\$160.000 e US\$180.000 por dia em contratos de curta duração e entre US\$350.000 e US\$400.000 por dia em contratos de longa duração (SKONNORD & EVANS, 2016). Mesmo assim, ainda que os valores das taxas de aluguel sejam mais baixos, eles ainda representam uma grande parcela dos custos. Inclusive, este cenário de crise estimula a busca pela otimização das operações, justificando este trabalho. Por exemplo, a mais importante companhia petrolífera brasileira busca maximizar a

economicidade e tornar sustentável a produção nos próximos anos, reduzindo custos operacionais por meio, por exemplo, da otimização da frota de embarcações de apoio logístico (PETROBRAS, 2016). Pretende-se diminuir o custo de extração do petróleo até 2021, como explicitado na Figura 3.

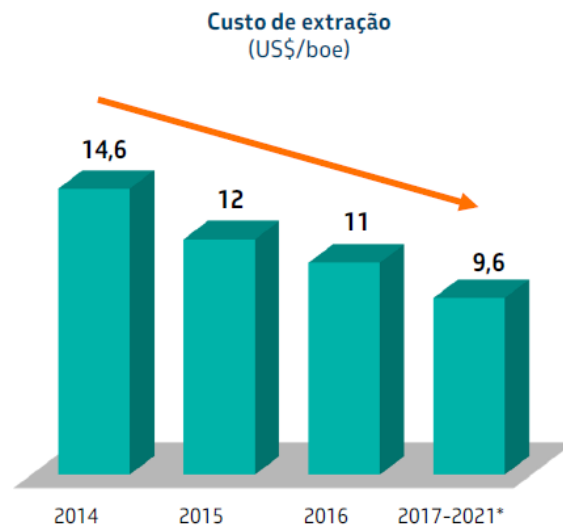


Figura 3. Perspectivas de diminuição do custo de extração. Fonte: PETROBRAS (2016)

Durante a perfuração, vários produtos precisam ser levados até as sondas, como carga geral, produtos químicos, comidas e água, *risers* e tubos (LEITE, 2012). A Figura 4 apresenta a percentagem de área de deck de embarcações supridoras demandada por cada um destes produtos.

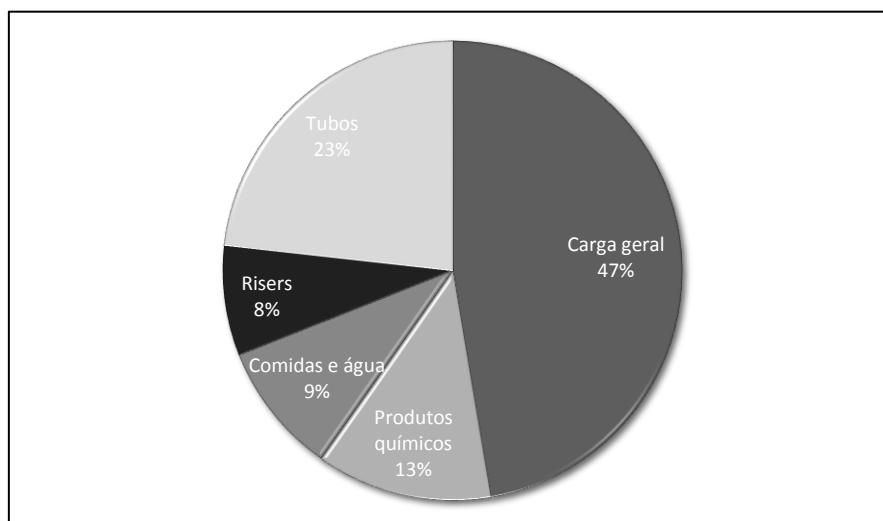


Figura 4. Produtos demandados por sondas e suas percentagens de área de deck demandadas.

Neste trabalho, os produtos foram divididos em três tipos principais: produtos com demanda estável (por exemplo, água), produtos com algumas flutuações em sua demanda (por exemplo, base para fluidos de perfuração) e produtos com provavelmente uma só demanda em todo o projeto (por exemplo, árvores de natal). Para produtos do primeiro tipo, pode-se realizar o planejamento do estoque de forma simplificada analisando o projeto a longo prazo. Para produtos do terceiro tipo, como a demanda é baixa, o armazenamento torna-se simples. Entretanto, o planejamento do estoque é mais complexo para produtos do segundo tipo. Por isso, decidiu-se focar esta pesquisa na base para fluidos de perfuração.

Fluidos desempenham funções primordiais e ligadas à segurança, logo a falta destes produtos é altamente indesejada, já que exige a parada da perfuração, resultando em altos custos. Ao mesmo tempo, sua logística é considerada bastante complexa, já que há uma série de complicadores, como, por exemplo, grandes quantidades de líquidos e produtos a serem transportados, sondas localizadas em regiões remotas, número limitado de plantas em terra e condições climáticas severas (ZAMORA *et al.*, 2000). Portanto, acaba-se tendo como motivação para este trabalho a procura por maneiras de serem evitadas paradas de produção devido a estas circunstâncias ao mesmo tempo em que se consiga manter a operação com baixos custos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a criação de uma lógica de simulação que englobe estoques de bases de fluidos nas unidades marítimas e o comportamento das embarcações. Utilizando esta ferramenta para planejamento de longo prazo, torna-se possível dimensionar diversos parâmetros para o sistema, como por exemplo tamanho de frota.

## **1.3 Estrutura**

Esta dissertação divide-se em sete capítulos: introdução, revisão bibliográfica, definição do problema, metodologia, experimentação, resultados e conclusões.

No primeiro capítulo, introdução, o tema foi apresentado, além de justificativas para a sua escolha e objetivos. No segundo capítulo é realizada uma análise sobre o material bibliográfico referente ao tema. No terceiro capítulo o problema é apresentado, explicando-se como ocorre o abastecimento de fluidos às unidades marítimas. No quarto capítulo, a metodologia para resolução do problema é apresentada. No quinto capítulo, a experimentação é detalhada, mostrando-se como as instâncias foram geradas e os experimentos planejados. No sexto capítulo, resultados dos experimentos são apresentados. Por fim, no sétimo capítulo analisa-se os resultados, conclusões são apresentadas e discute-se trabalhos futuros.

Ao final, dois anexos com resultados dos experimentos são apresentados.



## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, apresenta-se uma análise da produção bibliográfica referente ao tema. O problema de suprimento de fluidos caracteriza-se como um caso particular de suprimento *offshore*, por isso a busca bibliográfica foi concentrada em trabalhos relacionados ao tema. Inicialmente, apresenta-se alguns trabalhos de logística *offshore* que não abordam o problema a partir da simulação, mas cuja compreensão é importante para o entendimento de como a operação de suprimento *offshore* ocorre. Ao final são abordados trabalhos com estratégias de resolução dos problemas mais próximas à desta dissertação, envolvendo a simulação.

### 2.1 Logística *offshore*

A logística *offshore* é um tema bastante explorado pela literatura, por isso existe uma quantidade grande de trabalhos, muitos deles dedicados ao estudo de casos da indústria do petróleo. Existem trabalhos bastante diversificados, abordando tanto temas de ordem estratégica quanto tática ou operacional. Segundo AAS *et al.* (2008), é comum a abordagem de problemas do tipo como VRP (*vehicle routing problem*) neste campo de estudo.

Por exemplo, AAS *et al.* (2008) realiza a análise da logística *offshore* para o suprimento de unidades marítimas, mostrando-se como a operação transcorre. Trata-se de um estudo de caso do que ocorre na Noruega, mas, como a operação apresenta diversas similaridades com o que ocorre no Brasil, torna-se bastante útil para a compreensão do problema. Segundo o artigo, assim como no Brasil, apesar das embarcações do tipo PSV serem apenas alugadas pelas companhias petrolíferas, é sua competência realizar a programação das viagens e roteamento das embarcações. O trabalho discute como ocorre o transporte entre os portos e as unidades marítimas (sondas e unidades de produção), apresentando diversas informações sobre a operação, sobretudo relacionadas às embarcações. Ao final, realiza-se uma discussão sobre como determinar a frota ótima, dividindo-se o problema em dois: a busca por uma capacidade

total da frota que atenda as demandas das unidades e a capacidade de cada uma das embarcações individualmente.

Da mesma forma, HALVORSEN-WEARE & FAGERHOLT (2011) também abordam este problema com a proposição de uma modelagem matemática robusta para determinação do tamanho e composição ótima da frota e da programação de rotas. Na função objetivo, propõe-se minimizar os custos de aluguel das embarcações e do diesel gasto nas viagens. São consideradas restrições como janelas de tempo no porto, capacidade de armazenamento do porto e embarcações, limite de velocidade dos barcos, quantidade de visitas mínimas a serem realizadas e a demanda que deve ser suprida. São consideradas as incertezas relacionadas ao tempo de viagem devido a condições meteorológicas e a robustez é alcançada através da utilização em conjunto de uma modelagem de otimização com a simulação. HALVORSEN-WEARE *et al.* (2012) também revisita este problema.

Também existem outros trabalhos que apresentam especificamente o contexto brasileiro. LEITE (2012) apresenta o panorama da operação de barcos de apoio supridores de unidades *offshore* na Bacia de Campos. O autor descreve características dos consumidores, da carga típica demandada, das embarcações, dos portos, além da própria operação do sistema logístico. Ao final, uma nova política é proposta, com o objetivo de melhorar o nível de serviço da operação, e, através da simulação, é realizada uma análise da operação após as novas proposições, observando-se por exemplo o tamanho da frota necessária.

UGLANE *et al.* (2012) também aborda o contexto brasileiro, apresentando como ocorrem as operações. O autor propõe uma modelagem matemática determinística para o planejamento diário da programação e roteamento das embarcações, tendo-se como objetivo a minimização dos custos. Em busca de melhorias no nível de serviço, propõe-se uma metodologia de roteamento dinâmica, com redefinições das rotas diariamente, diferentemente do que ocorre na operação real, que conta com rotas fixas determinadas a partir de um planejamento tático prévio. Durante a apresentação dos resultados, também foi realizada uma discussão sobre o tamanho e a composição da frota.

Discussões sobre vários problemas relacionados à logística *offshore* também são apresentados em HAMACHER & FERREIRA FILHO (2015) e em FERREIRA FILHO (2016). Outros problemas também são encontrados na literatura, como o do sequenciamento de operações em portos, abordado por CHAGAS (2015).

Em relação a fluidos, a literatura em geral apresenta pouca documentação relacionada à logística de suprimento. Em geral, preocupa-se com questões químicas relacionadas aos fluidos e suas funções ao longo da perfuração. Entretanto, existem alguns trabalhos que citam problemas logísticos relacionados a fluidos, como ZAMORA *et al.* (2000), onde os autores descrevem as dez maiores preocupações relacionadas a fluidos durante operações de perfuração em regiões ultra profundas e uma das preocupações citadas é exatamente relacionada à logística. Segundo os autores, durante as operações pode-se ter que lidar com problemas como grandes quantidades de líquidos e produtos demandados, locações remotas, número limitado de locações *onshore* e condições climáticas severas. A maior preocupação está relacionada a seu descarte após a utilização, por isso vários trabalhos mencionam este problema como ALBA *et al.* (2007), SVENSEN *et al.* (2011) e DOS SANTOS & VELOSO (2013). Segundo esses trabalhos, dependendo da especificação, o descarte pode ser proibido, exigindo-se, portanto, o seu recolhimento, que, em ambiente *offshore*, é realizado por embarcações fluideiras.

## **2.2 Logística *offshore* abordada por simulação**

Nesta dissertação, propõe-se como objetivo principal determinar uma ferramenta de simulação que possa ser utilizada no planejamento tático da logística *offshore*, podendo-se determinar o tamanho ótimo da frota. Muitos trabalhos apresentam abordagem semelhante, apresentando a problemática da logística *offshore* discutida a partir da simulação.

Segundo BALCI (1994), simulação é o processo de experimentação computacional de um modelo representativo de um sistema que possui algum problema, com o objetivo de sua resolução. Segundo o autor, problemas resolvidos por simulação em geral possuem o seguinte ciclo de vida: comunicação do problema, formulação,

proposição de resolução por simulação, definição dos objetivos, criação do modelo conceitual, programação do modelo, experimentação, análise dos resultados (com possível redefinição do problema) e decisão.

TERZI & CAVALIERI (2004) realizaram uma classificação dos trabalhos mais recentes relacionados à simulação utilizada no contexto da cadeia de suprimentos. Quanto aos objetivos, podem ser encontrados artigos que pretendem utilizar a simulação no projeto da cadeia de suprimentos ou como suporte para decisões estratégicas durante a operação. Ainda segundo TERZI & CAVALIERI (2004), quanto aos processos modelados, existem trabalhos focados no planejamento de demandas, planejamento da cadeia de suprimentos, planejamento de estoques, planejamento do transporte e planejamento da produção. Destes, relaciona-se com o tema desta dissertação sobretudo o planejamento de estoques e do transporte.

Existem alguns trabalhos que analisam problemas da logística *offshore* sob a ótica da simulação. Por exemplo, SHYSHOU *et al.* (2010) propõem um problema semelhante ao discutido nesta dissertação, com a diferença de que neste caso trata-se de um estudo de caso das embarcações AHTS (*anchor handling tug supply*). Como muitas sondas não tem propulsão própria, embarcações AHTS são utilizadas para o reboque destas após o final da perfuração de um poço até novas locações. Os autores utilizam da simulação para replicar as movimentações das embarcações: as preparações no porto, a viagem até as sondas, o recolhimento da âncora, a viagem até as novas locações e a nova ancoragem. São consideradas incertezas meteorológicas que possam impactar na velocidade das embarcações. O objetivo final é a determinação da frota ótima.

Alguns trabalhos tratam de problemas ainda mais semelhantes ao discutido nesta dissertação. Por exemplo, MAISIUK & GRIBKOVSKAIA (2014) discutem uma forma de determinar composição ótima da frota de PSVs e rota. Diferentemente de grande parte da literatura que trata este problema como determinístico, os autores propõem a utilização da simulação, podendo-se englobar assim também características estocásticas do problema, garantindo-se robustez para a solução encontrada. Durante a simulação, planejamentos semanais reais são utilizados e expostos a atrasos e mudanças devido às incertezas relativas às condições meteorológicas; são simulados diversos cenários de tamanho da frota e, ao final, pretende-se determinar o mais adequado. Trata-se de um problema bastante semelhante ao tratado nesta dissertação, com a diferença de que, ao

invés dos atendimentos às unidades marítimas serem feitos sob demanda, existirem planejamentos semanais com rotas pré-determinadas definidas previamente a partir de um modelo exato.

ANEICHYK (2009) também propõe uma abordagem por simulação para determinação da frota ótima de embarcações do tipo PSV. Algumas particularidades, entretanto, são consideradas, como a existência de janelas de tempo nas unidades marítimas. Além disso, diferentemente dos outros trabalhos, além de incertezas meteorológicas, também são consideradas incertezas nas demandas das unidades marítimas e no suprimento por parte dos armazéns.

## **2.3 Considerações finais**

Nesta dissertação, objetiva-se o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação que replique as condições operacionais, por isso, atentou-se para ter como premissas detalhes descritos nos trabalhos, sobretudo os referentes ao contexto brasileiro. O objetivo central da dissertação é a utilização da ferramenta desenvolvida para a determinação do tamanho da frota de embarcações, o que parece estar alinhado com as preocupações reais operacionais da indústria, haja vista a grande quantidade de trabalhos que realizam esta análise.

Outros trabalhos apresentam estratégias semelhantes para determinação da frota ótima, utilizando-se a simulação, assim, nota-se que a estratégia discutida pela dissertação está alinhada com a literatura. Traz-se como originalidade sobretudo a forma como as incertezas foram consideradas, já que invés de serem consideradas estocasticidades sobretudo nas condições meteorológicas e na velocidade das embarcações supridoras, considera-se nesta dissertação incertezas no planejamento das demandas. Além disso, a dissertação traz um foco sobre o suprimento de fluidos, algo muito pouco explorado pela literatura.

### 3 Definição do Problema

Durante esta dissertação, pretende-se estudar a logística envolvida no suprimento de bases para fluidos de perfuração às sondas responsáveis pela perfuração de poços de petróleo *offshore*. De acordo com o *Council of Logistics Management*, logística é a parte dos processos da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla eficientemente o fluxo convencional e reverso, além do armazenamento de materiais, serviços e informações entre a origem e o consumidor, com o objetivo de cumprir pedidos (LANGEVIN & RIOPEL, 2005). As decisões tomadas pela logística variam desde decisões de longo prazo, como níveis de serviço e estrutura da rede logística, até decisões de curto prazo, como decisões táticas e operacionais para o roteamento de veículos (LANGEVIN & RIOPEL, 2005).

Dentre os campos estudados pela logística, este trabalho está voltado para a gestão da cadeia de suprimentos. Este campo engloba decisões como: onde produzir, quantidades produzidas, quantidade de estoque em cada estágio do processo, como transmitir a informação entre entes envolvidos, onde localizar plantas, além de decisões relacionadas à movimentação dos produtos (LANGEVIN & RIOPEL, 2005). Em especial, neste trabalho pretende-se ter como foco dois destes campos: o da administração dos estoques e o da movimentação dos produtos.

Um dos modelos mais antigos presentes na literatura utilizados para a gestão de estoques é o modelo de lote econômico (EOQ), que propõe modelar o tamanho do lote minimizando custos de manutenção do estoque e custos do pedido (FERREIRA FILHO, 2016). Segundo ZIUKOV (2015) este modelo foi proposto inicialmente em 1913, por HARRIS (1913).

Segundo FERREIRA FILHO (2016), estoques apresentam uma série de funções, podendo ser estoques de segurança (buscando lidar com incertezas na demanda), estoques de antecipação (estoques para evitar sobrecargas em períodos com muitos pedidos), estoques de fragmentação (estoques para diminuir a dependência entre estágios de produção, como o *just-in-time*), estoques em trânsito (devido à movimentação de materiais) e estoques cíclicos (para tentar diminuir o custo total de

manutenção dos estoques). Cabe a um administrador tentar minimizar os custos relativos a estoques, sendo eles os custos de pedidos, custos de manutenção do estoque, custos de falta, custos associados à capacidade do estoque e custos dos produtos. Isto posto, algumas decisões precisam ser tomadas: quando realizar o pedido, qual a quantidade pedida, como tratar incertezas e como controlar o estoque. Pretende-se, neste trabalho, realizar um estudo relacionado aos estoques de fluidos tentando-se responder a estas perguntas. Além disso, pretende-se analisar o impacto nos estoques provenientes da movimentação dos produtos durante o transporte dos fluidos, desde o porto até as unidades marítimas através de embarcações do tipo PSV (*platform supply vessel*).

Durante a pesquisa proposta, pretende-se utilizar o suporte da pesquisa operacional. Segundo HILLIER & LIEBERMAN (2006), a pesquisa operacional tem como objetivo a pesquisa sobre operações, isto é, dar suporte a problemas que envolvem condução e coordenação de operações, utilizando-se do método científico para isso. Segue-se a seguinte estratégia: primeiramente observa-se e formula-se o problema (extraíndo dados relevantes), a seguir é construído um modelo científico (matemático), são realizados procedimentos computacionais para obter soluções para o problema e, por fim, são realizadas experimentações para testar a hipótese de que o modelo é uma representação suficientemente precisa da realidade (HILLIER & LIEBERMAN, 2006). Neste trabalho, a observação do problema foi realizada a partir da leitura de documentação, além de entrevista com especialistas e profissionais de uma empresa petrolífera. A partir disto, pôde-se realizar a construção de um modelo representativo da realidade e propor uma modelagem computacional para a análise do problema, utilizando-se nesta etapa o suporte da simulação.

A simulação é uma técnica utilizada para imitar a operação de um sistema, gerando-se aleatoriamente a ocorrência de vários eventos, para que se possa avaliar e comparar diversos procedimentos operacionais (HILLIER & LIEBERMAN, 2006). Pretende-se simular o dia-a-dia operacional das sondas, em que cada sonda, a cada dia, gera um plano de pedidos baseado em uma estimativa de demandas futuras. Para imitar este comportamento, para cada horizonte de planejamento, uma nova simulação é realizada, considerando-se diferentes demandas estocásticas. Esta simulação compreende tanto os cálculos de estoque quanto a mecânica de movimentação da frota.

Ao final da simulação, pode-se obter os estoques de cada uma das unidades marítimas e do porto.

Em específico, será analisado a logística de fluidos de perfuração. Eles possuem diversas funções ao longo da operação, por exemplo, eles são os responsáveis por remover resíduos sólidos gerados pela perfuração, manter a pressão hidrostática no poço, manter a estabilidade do poço, manter a broca limpa e lubrificada, além de reduzir a fricção sobre a broca (DOS SANTOS & VELOSO, 2013). Durante toda a perfuração, é indispensável que o poço esteja preenchido por fluidos, para que suas funções, inclusive ligadas à segurança da operação, sejam corretamente desempenhadas.

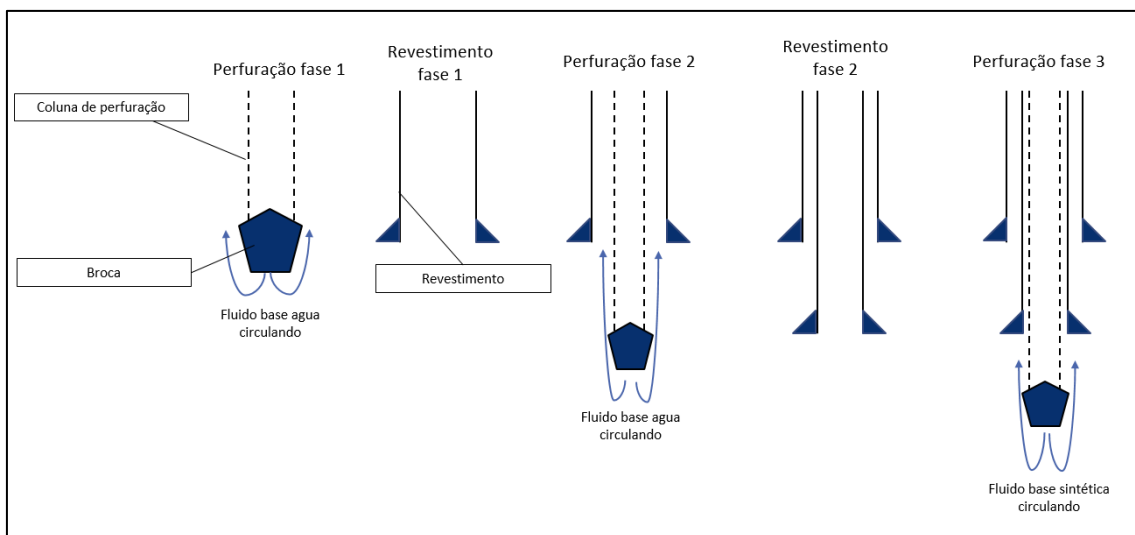
Fluidos possuem uma série de componentes básicos, como dispersantes, agentes condicionadores de viscosidade, gelificantes, floculantes, agentes de controle de alcalinidade e inibidores químicos ou físicos (DOS SANTOS & VELOSO, 2013). Todos esses produtos são indispensáveis durante a perfuração, tornando a logística desses suprimentos bastante importante. Desses produtos, de fato, itens transportados em sacos e graneis possuem questões logísticas bem interessantes, sobretudo ligadas ao complexo controle do estoque, entretanto, não serão foco deste trabalho. Pretende-se estudar sobretudo a logística de suprimento dos dispersantes, também chamados de base do fluido, esta escolha deve-se acima de tudo ao grande volume demandado deste tipo de produto, cujas capacidades em sondas ficam entre 12.000 bbl e 16.000 bbl e demandas podem chegar até a valores entre 15.000 bbl e 30.000 bbl em condições excepcionais (ZAMORA *et al.*, 2000). Além disso, trata-se de um item primordial na constituição dos fluidos.

Existem vários tipos de bases de fluidos, como base óleo, base água ou sintética. Bases óleo são utilizadas para inibição de folhelhos e para aumentar a lubrificação e a capacidade de limpeza, sendo utilizadas em condições de alta temperatura e pressão. Bases sintéticas possuem propriedades semelhantes à base óleo, mas com o benefício de serem biodegradáveis. Enquanto isso, bases água são mais baratas e geram menos resíduos (DOS SANTOS & VELOSO, 2013). Para cada fase da construção de um poço, um tipo de fluido é especificado no projeto.

A perfuração de um poço precisa ser dividida em diversas fases. Em cada fase, é realizada a descida da coluna de perfuração, a perfuração propriamente dita, a



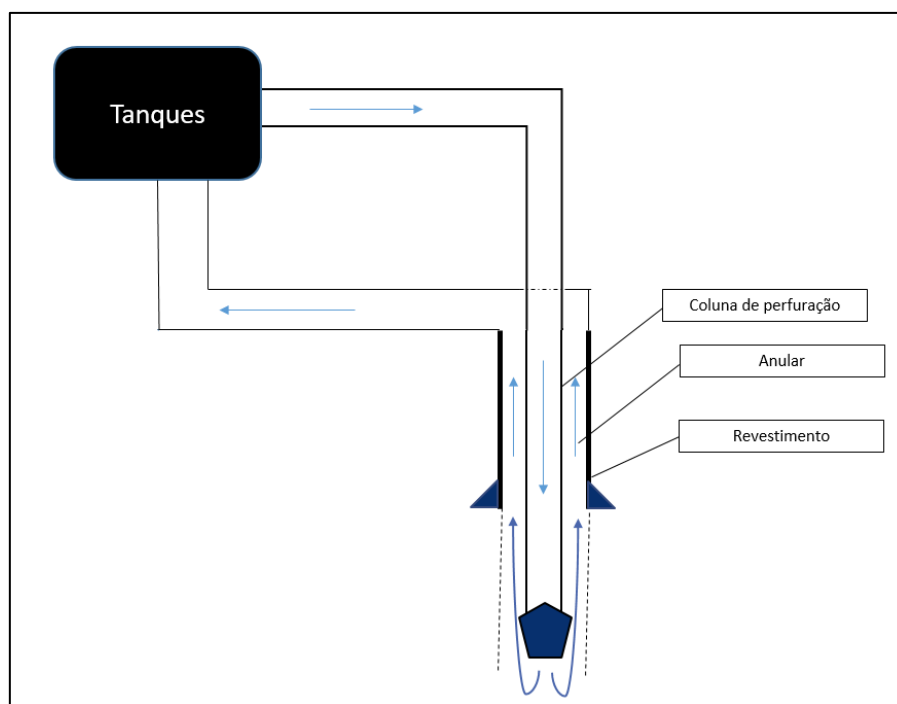
cimentação, assentamento do revestimento, a instalação de equipamentos, dentre outras atividades, e, ao final, reinicia-se o processo com a fase seguinte. A operação é realizada dessa forma porque não é possível perfurar um poço em apenas uma fase, tendo em vista que a manutenção de longos trechos perfurados sem cimentação ocasionaria no interior do poço pressões altas demais para o trecho mais superficial ainda não cimentado ou pressões baixas demais, a ponto de induzir a surgência nos trechos mais profundos. Este processo é explicitado na Figura 5, em que se apresenta a evolução da perfuração de um poço genérico, ao longo de suas fases.



**Figura 5. Sequência de operações realizada ao longo das fases da construção de um poço.**

Nas primeiras fases, trabalha-se com o poço aberto e complicações operacionais são mais raras, portanto pode-se utilizar fluido de base água, que, dependendo da especificação exigida, pode ser água do mar. Da mesma forma, ao fim da utilização, caso o fluido esteja corretamente especificado, pode haver o descarte no próprio oceano. Assim, preferiu-se não estudar a logística do fornecimento nessas fases, devido à sua simplicidade. Nas fases finais, em geral passa-se a trabalhar com fluido de base sintética, devido às características geológicas dessas fases. Como uma mesma sonda não possui capacidade em tanques suficiente para estocar os dois tipos de fluidos ao mesmo tempo, torna-se necessário, portanto, suprir a unidade com o tipo de fluido requerido em cada fase.

Fluidos devem permanecer em circulação no sistema continuamente conforme explicitado na Figura 6, não havendo consumo efetivo dos produtos. Entretanto, conforme a necessidade de fluidos circulantes aumenta, a quantidade de fluido nos tanques é diminuída, resultando em um consumo aparente, que será o objeto de estudo deste trabalho. Será considerado que essas demandas são proporcionais ao volume do poço e consequentemente também à profundidade perfurada, dado que há a necessidade de preenchimento do poço para que os fluidos continuem exercendo suas funções corretamente.



**Figura 6. Sistema de circulação de fluidos de perfuração.**

Na Figura 7 é apresentado um histograma com as demandas esperadas de acordo com a metodologia proposta por este trabalho, considerando-se apenas as fases em que há consumo de fluido de base sintética. A demanda se comporta com um pico durante a troca de fluidos e com um consumo menor diário ao longo dos períodos em que há perfuração e a profundidade do poço é aumentada.

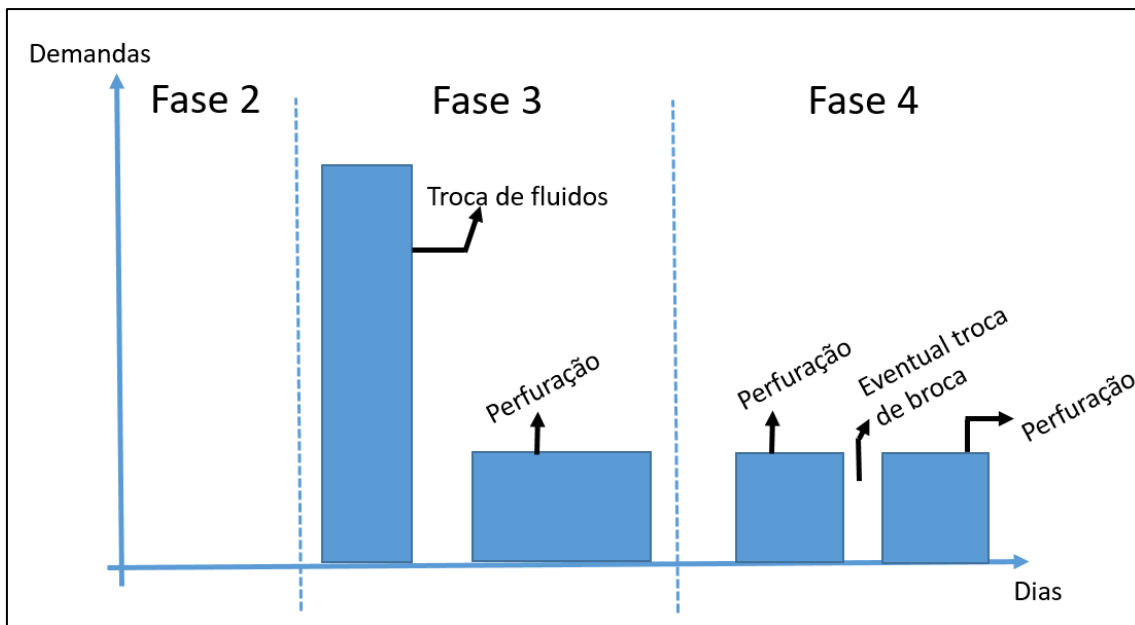


Figura 7. Padrão de demandas de fluidos ao longo da perfuração.

Em geral, unidades marítimas possuem estoques limitados (AAS *et al.*, 2008), por isso, torna-se essencial sua administração de forma correta. Estoques são necessários devido a diversos fatores, como, por exemplo, flutuações nas demandas e incertezas no suprimento (MULLER, 2011). No problema estudado, as flutuações na demanda ocorrem sobretudo devido às incertezas na duração de atividades prévias à perfuração e de atividades executadas durante a perfuração, podendo ter origens devido a eventos não planejados, como, por exemplo, necessidade de troca de broca ou formações geológicas não esperadas, de perfuração mais complexa. Quanto às incertezas no suprimento, deve-se lembrar que, por se tratar de ambiente *offshore*, o transporte é realizado por barcos e, por isso, apresenta uma série de complicadores.

Para o atendimento de sondas de perfuração *offshore*, os fluidos devem partir sempre de algum porto, que funcionam como armazéns, agregando estoques e servindo como pontos de partida para as rotas que levarão os produtos até os clientes. Antes de serem armazenados nos portos, os produtos podem vir de outros armazéns e pode haver um transporte terrestre envolvido, entretanto neste trabalho esses processos serão desconsiderados já que podem ser de competência de outras empresas. No Brasil, a mais importante companhia petrolífera utiliza uma série de portos: Angra dos Reis, Vila Velha (CPVV), Ilha d'água, Imbetiba, Itajaí, Rio de Janeiro, Samarco e Santos.

Entretanto, dentre estes portos, destaca-se o terminal de Imbetiba, em Macaé, que concentra 54% de todas as atividades e 78% de todas as atividades relacionadas a fluidos (LEITE, 2012). Como esses números são bastante expressivos e as instâncias deste trabalho consideram apenas unidades marítimas da Bacia de Campos, que são próximas a este porto, é feita a simplificação de que todos os clientes devem ser atendidos por este único porto. O porto de Macaé possui seis berços, dos quais um deles é exclusivo para o abastecimento de embarcações de fluidos (CHAGAS, 2015). Neste trabalho, admite-se que este berço é suficiente para todas as operações de carregamento, portanto capacidades de atendimento no porto são desconsideradas.

A base dos fluidos é transportada desde o porto até as unidades marítimas através de embarcações do tipo PSV (*platform supply vessel*) como as da Figura 8. No Brasil, a mais importante companhia petrolífera possui frotas dedicadas para tipos específicos de carga, dentre elas uma frota dedicadas a fluidos (LEITE, 2012), apesar de barcos PSV terem como característica a possibilidade de serem multipropósito (Aas *et al.*, 2008). Em geral, a base do fluido é transportada em tanques específicos e os outros aditivos que estejam em sacos, toneis e graneis podem ser transportados como carga de convés (LEITE, 2012).



**Figura 8. Embarcações do tipo PSV ancoradas no porto de Macaé. Fonte: Acervo pessoal do autor.**

O custo do aluguel e da operação de barcos de apoio pode ser considerado um dos maiores custos encontrados na logística *upstream*, isto é, na logística necessária para suprir unidades de produção e sondas. Por isso, o ideal é maximizar os dias em mar e a utilização da capacidade do PSV, apesar de que, devido aos altos custos de falta nas unidades marítimas, a logística deve ser planejada pensando também nos clientes (AAS *et al.*, 2008). No Brasil, o mercado do tipo *spot* ainda não é bem desenvolvido (LEITE, 2012), portanto contratos de aluguel são feitos apenas a longo prazo. Outros custos, como combustível e despesas portuárias, são de responsabilidade da companhia (LEITE, 2012).

Considera-se que ao sair do porto o PSV tenha seu tanque completamente abastecido, apresentando um volume de fluido igual à sua capacidade. O barco realiza então uma rota descarregando volumes de fluidos nas unidades marítimas de acordo com o pedido realizado por elas e recolhendo fluidos já utilizados. A rota chegará ao fim quando o volume carregado pelo barco estiver abaixo do ponto de ressuprimento ou quando houver necessidade de troca de turma. Neste trabalho, assume-se que, a cada dia, novas movimentações do barco são geradas a partir da alocação de demandas de clientes ao barco mais próximo que possua volume em tanques suficiente para atender o pedido e que não esteja já em viagem ou em atendimento. Considera-se que fluidos sintéticos podem ser reutilizados mais de uma vez em perfurações de mais de um poço, portanto *backloads* recolhidos podem ser reutilizados posteriormente em outros poços.

Segundo WINDECK (2013), no transporte marítimo existem dois níveis de planejamento: operacional e tático. O planejamento operacional é feito no dia-a-dia, sendo responsável pela definição de rotas e programação por exemplo. O planejamento tático é realizado para ações de longo prazo como ajustar o tamanho e as características da frota. Neste trabalho, busca-se desenvolver uma ferramenta que simule o planejamento operacional, definindo rotas para os próximos dias e quantidades que deverão ser entregues para manter o estoque em níveis aceitáveis. Pretende-se realizar neste trabalho uma análise que possibilite o planejamento tático, repetindo-se o planejamento diário tantos quanto forem os dias no horizonte de planejamento, através da simulação. Diferentes cenários de tamanho de frota serão testados sob algumas replicações e, ao final, os resultados serão avaliados. O objetivo é determinar um

tamanho de frota mínimo que seja suficiente para evitar faltas, testado sob diferentes replicações da simulação, com diferentes padrões de demandas estocásticos.

A partir das premissas apontadas até este ponto, resta a implementação desta lógica em uma ferramenta de simulação, cuja discussão aprofundada será objetivo do próximo capítulo.

## 4 Metodologia

Nesta seção, a estratégia utilizada para a resolução do problema é apresentada. Primeiramente, apresenta-se a formulação geral do problema, mostrando-se como a lógica se organiza. Nas seções seguintes, a formulação de cada um dos passos realizados ao longo da simulação é apresentada com maiores detalhes.

### 4.1 Formulação do Problema

O problema é tratado através de uma simulação. Segundo KELTON *et al.* (2010), em um modelo de simulação estão presentes entidades, atributos, variáveis, recursos, filas, estatísticas, eventos e tempo de simulação.

Entidades são elementos que se movem pelo sistema, mudam de estados, afetam outras entidades e afetam as medidas de saída do sistema; no caso deste trabalho são as embarcações do tipo PSV além do porto e sondas. Atributos são propriedades das entidades, ou seja, no problema simulado são propriedades como capacidade restante do PSV, indicador de disponibilidade do PSV e estoque na sonda. Variáveis globais são indicadores do sistema. Recursos são elementos que em algum momento são capturados por entidades e em um momento posterior liberados, no caso do presente problema, são os pedidos de fluidos. Filas existirão apenas em caso de indisponibilidade de embarcações. Como estatísticas coletadas, destaca-se a percentagem de dias em que ocorreu falta, percentagem média de utilização da frota, etc. Evento define-se como uma ação que ocorre na simulação em um determinado momento, podendo mudar atributos, variáveis e estatísticas; no caso do problema simulado são os carregamentos e descarregamentos de fluidos realizados pelo PSV no porto e nas unidades marítimas. O tempo de simulação não é contínuo, mas sim discreto, havendo atualizações diariamente.

Admite-se um horizonte de planejamento  $H$  e uma quantidade  $N$  de poços investigados. Pode-se determinar o conjunto  $T_i = (i: 1, \dots, H)$  representando os tempos em

que cada planejamento diário é realizado, o conjunto  $T_j=(j: 1,...,H)$  representando cada dia do passado ou do futuro cujos dados são analisados e o conjunto  $W=(w: 1,...,N)$  representando cada um dos poços perfurados durante toda sua análise. A simulação consiste em um procedimento iterativo conforme o Algoritmo 1:

---

Algoritmo 1: Processo de simulação

---

```

1: for  $i \in I$  do
2:   for  $j \in J$  do
3:     for  $w \in W$  do
4:       Simulação( $i,j,w$ )
5:     end for
6:   end for
7: end for

```

---

A simulação consistirá, então, de um processo iterativo onde uma rotina será executada inúmeras vezes. Para explicar esta rotina, pode-se separá-la em dois núcleos: um responsável por determinar os níveis de estoque de cada unidade e disparar pedidos e outro núcleo responsável por simular a movimentação das embarcações na bacia e determinar sua disponibilidade. Esta integração entre os dois núcleos está na Figura 9, que mostra a lógica realizada para cada poço  $w$  em um determinado planejamento  $i$  para um dia  $j$ .

O restante desta seção está dedicado a explicar mais detalhadamente cada um desses núcleos, primeiramente focando na simulação de estoques e posteriormente na simulação da movimentação dos PSV.



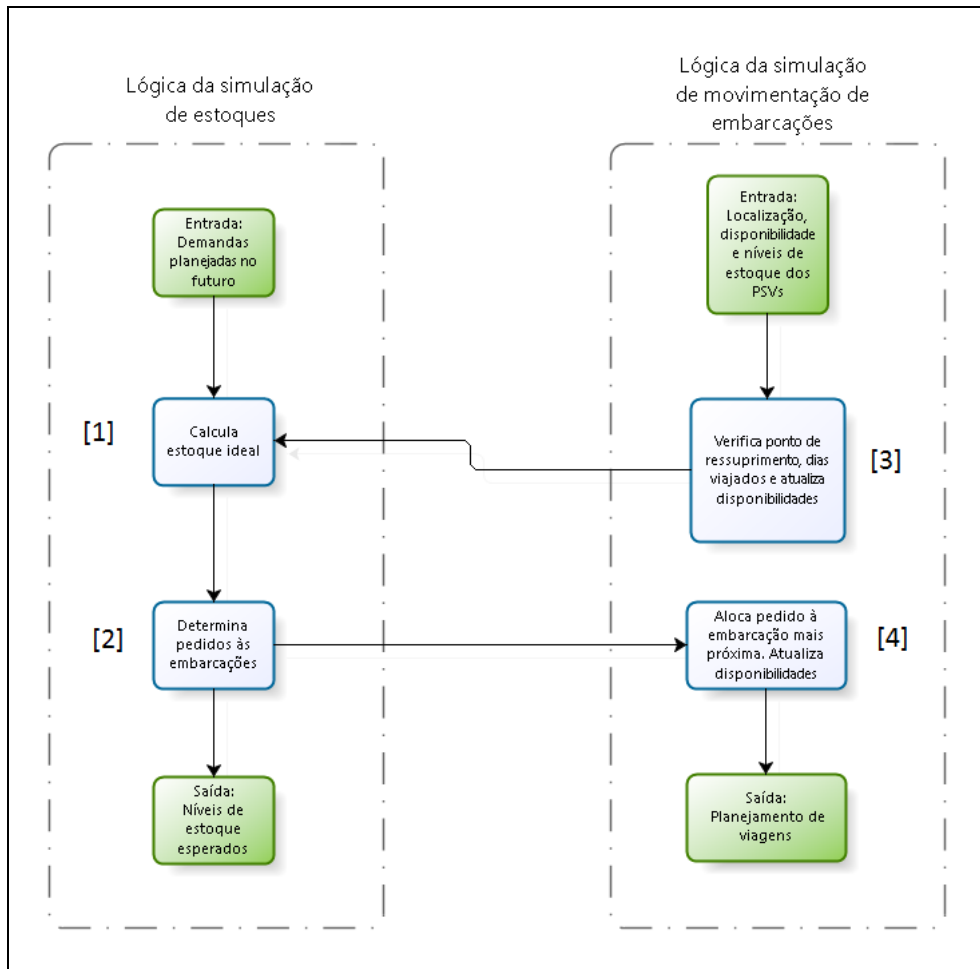


Figura 9. Lógica da simulação para cada poço  $w$  no planejamento do dia  $i$  para o dia  $j$

#### 4.1.1 Lógica da simulação de estoques

Os dados de entrada da simulação de estoques consistem em demandas planejadas em cada um dos dias  $i$  para cada um dos dias  $j$ , expressos em uma matriz de dimensão  $H \times H$  com elementos  $D(i, j)$ .

O primeiro passo da lógica, compreendendo o processo [1] da Figura 9, consiste na determinação do estoque ideal para os próximos dias. Admite-se que a política de estoque seja tentar manter na unidade marítima quantidades de fluidos suficientes para a operação em uma certa quantidade de dias subsequentes, garantindo-se a operação por estes dias caso a visita de embarcação supridora seja impossibilitada. Ou seja, trata-se de um estoque de antecipação que seja suficiente ao menos para manter a operação em um número definido de dias no futuro, segundo uma certa previsão para as demandas. Assim, no modelo simulado, considera-se o estoque ideal como o somatório das

demandas de  $S$  dias adiante, sendo  $S$  um parâmetro determinado inicialmente. Esse estoque ideal não pode ser maior do que a capacidade da sonda:

$$I(i, t) = \sum_{j=i}^{j+S} D(i, j), \quad \text{Se } I(i, j) < C, \quad [4.1]$$

Ou:

$$I(i, t) = C \quad \text{Se } I(i, j) \geq C. \quad [4.2]$$

A seguir, como explicitado no processo [2] da Figura 9, precisa-se definir as quantidades entregues. Estes volumes são definidos desejando-se que, nos dias em que haja entregas, o estoque consiga chegar a seu valor ideal. Entretanto, caso durante o planejamento o barco já tenha saído para fazer entrega, os valores definidos anteriormente não podem ser alterados. Portanto, o valor entregue no dia  $j$  segundo o planejamento  $i$  será definido pela matriz  $R(i, j)$  de acordo com a seguinte expressão:

$$R(i, j) = \begin{cases} I(i, j) + D(i, j) - P(i, j - 1) & \text{se } j > i + l \text{ e } E(j) = 1 \\ R(i - 1, j) & \text{se } i \leq j \leq i + l \text{ e } E(j) = 1 \\ 0 & \text{se } E(j) = 0 \end{cases} \quad [4.3]$$

Onde:  $E(j)$  é um vetor de elementos binários que será igual a 1 nos dias em que se há entrega e 0 nos dias em que não haja entrega;  $l$  é o *lead-time*, ou seja, o tempo de viagem da embarcação desde sua última localização até esta nova posição; e  $P(i, j)$  é a quantidade planejada para o estoque segundo o planejamento  $i$  para o dia  $j$ .

O estoque planejado em  $i$  para o dia  $j$  será então dado por:

$$P(i, j) = P(i, j - 1) - D(i, j) + R(i, j). \quad [4.4]$$

#### 4.1.2 Lógica da simulação de movimentação de embarcações

Define-se o conjunto de clientes  $C$  como sendo a união do conjunto de poços  $W$  com o porto (para o qual é definido índice zero). Assim,  $C = \{0, \dots, N\}$ .

Define-se também a matriz  $L_b$  de dimensão  $H \times H$  como uma matriz em que cada elemento  $L_b(i,j)$  apresenta a localização do barco  $b$  no instante  $j$  segundo o planejamento  $i$ .  $L_b(i,j)$  assumirá o valor dos índices dos clientes caso o barco esteja parado ou -1 quando estiver em viagem.

Já a matriz  $D_b$  de dimensão  $H \times H$  é uma matriz binária onde  $D_b(i,j)$  assume valor 1 para os dias  $j$  de cada planejamento  $i$  em que o barco  $b$  esteja em operação: viajando, efetuando abastecimento ou efetuando descarregamento.

Por fim, define-se a matriz  $N_b$  de dimensão  $H \times H$  como uma matriz em que cada elemento  $N_b(i,j)$  representa os níveis atuais de fluidos nos tanques do barco  $b$  no instante  $j$  segundo o planejamento  $i$ .

O primeiro passo da lógica de simulação é explicitado no processo [3] da Figura 9, que se repete para cada um dos barcos verificando se há necessidade de realizar uma viagem até o porto. Existem duas situações em que isso pode acontecer: chegou-se ao ponto de ressuprimento ou o número máximo de dias navegando foi excedido (devido à necessidade de troca de turma). Portanto, verifica-se se  $N_b(i,j)$  está abaixo do ponto de ressuprimento ou se, de acordo com a matriz  $L_b$ , o tempo desde a última visita ao porto excede o número máximo. Se isto ocorrer, uma viagem ao porto deve ser realizada, alterando-se os valores de  $L_b$  e  $D_b$ . Na Figura 10, essa lógica é apresentada.

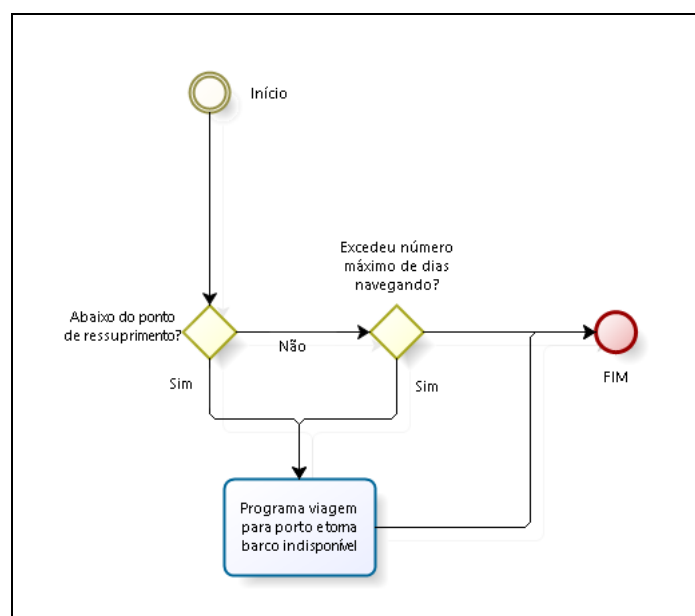
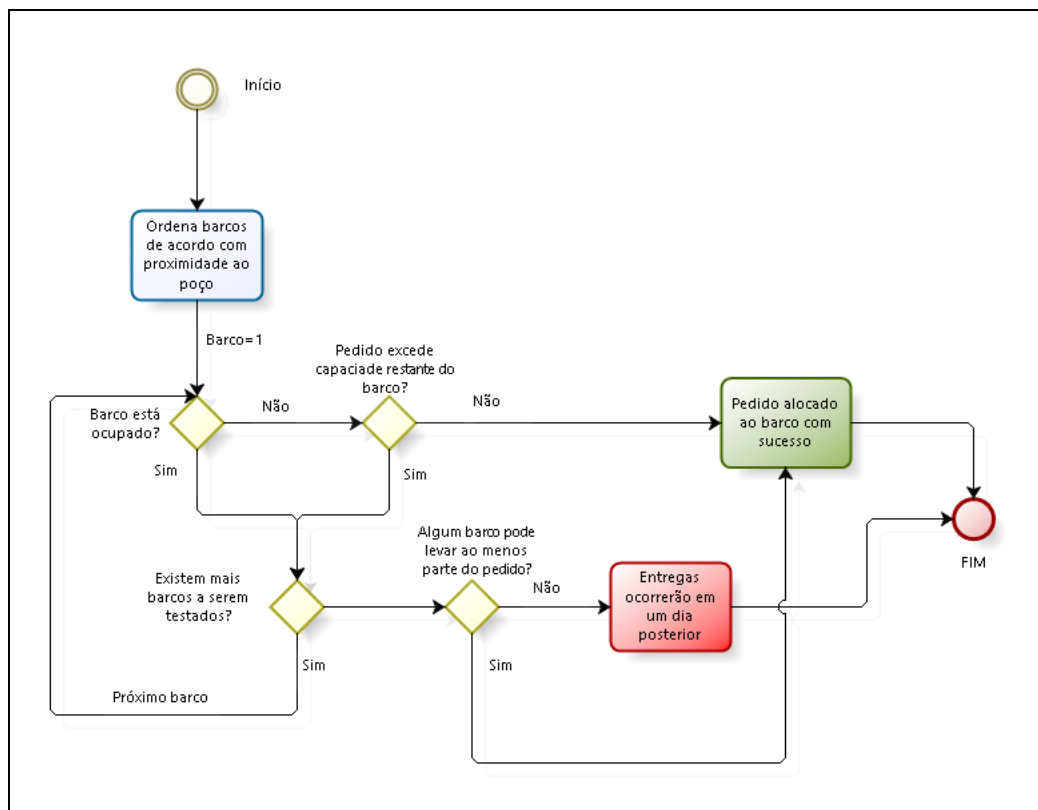


Figura 10. Lógica de programação de viagens para o porto para cada um dos barcos.

A seguir, escolhe-se o barco que atenderá à sonda em caso de ocorrência de pedido, como explicitado pelo processo [4] na Figura 9. É dada prioridade sempre ao barco que esteja mais próximo e que possua capacidade suficiente para atender à quantidade que seria demandada, entretanto, caso não haja nenhum barco com capacidade suficiente, aceita-se utilizar um barco com capacidade menor do que a necessária, fazendo entrega de apenas parte do pedido. Em casos mais extremos, em que nenhum barco possui qualquer capacidade ou todos estejam ocupados, o pedido não é entregue no dia correto, ocorrendo a entrega apenas na próxima viagem programada para a unidade. Esta lógica é apresentada na Figura 11.



**Figura 11. Lógica de escolha do barco**

Com o barco escolhido, torna-se possível definir o *lead-time*. Neste trabalho, considerou-se que o *lead-time* seria igual ao tempo de viagem necessário para o barco escolhido realizar a viagem. Considera-se 3 velocidades possíveis para a embarcação: uma para o trecho porto-unidade, outra para o trecho unidade-unidade e outra para o

trecho unidade-porto. Com o *lead-time* calculado, são feitos os cálculos referentes à lógica de estoques explicitados anteriormente. Para os casos em que  $R(i,j)$  é diferente de zero, ou seja, há pedidos, é então programada uma viagem, alterando-se os valores de  $L_b(i,j)$  e  $D_b(i,j)$ .

Para os casos em que o poço já tenha tido a sua perfuração finalizada, é realizado o *backload* de todo o fluido utilizado. Como fluidos do tipo sintético podem ser reutilizados posteriormente em outros poços, ocorre na prática um abastecimento dos tanques do barco de apoio e lógica é semelhante à lógica de pedidos convencionais, entretanto os valores da demanda apresentam valores negativos. Em caso de a capacidade do barco ser excedida, é possibilitada a divisão deste *backload* em várias viagens. Entretanto, é estabelecido um período máximo após o final da perfuração para que esta atividade seja executada, já que se espera que, tão logo todas as atividades sejam finalizadas no poço, a sonda mova-se para outra localização.

## 5 Experimentações

Nesta seção, primeiramente é abordado o processo de criação de instâncias estocásticas para a simulação. Busca-se uma metodologia para gerar diferentes demandas para cada instância, mantendo-se o caráter realista dos dados. A seguir, é abordado o processo de experimentação, destacando-se a forma como os experimentos foram organizados e os parâmetros considerados na simulação.

### 5.1 Criação das instâncias

Nesta seção, é explicado o processo de criação de instâncias, que tem como objetivo gerar, em cada dia do horizonte de planejamento, uma previsão das demandas para cada um dos dias no futuro, dentro do horizonte de planejamento. Admite-se que as diferenças nos padrões de demandas são exclusivamente devido às alterações no tempo de execução de cada uma das atividades realizadas durante a operação da sonda. Portanto, o procedimento aqui descrito tem como objetivo primário gerar durações aleatórias para as atividades e, a partir destas durações, finalmente construir o padrão de demandas.

Há a disponibilidade dos dados de P10, P75 e média da duração de cada uma das atividades da perfuração, entretanto não há dados disponíveis de distribuições para estas variáveis. Há, também, a disponibilidade dos dados de quantidade consumida e tipo de fluido consumido durante cada fase. Ambos os dados são para um poço típico, com quatro fases, sendo que as duas primeiras utilizam fluido de base água e as duas últimas utilizando fluido sintético.

O primeiro objetivo consiste, portanto, em traduzir os percentis das durações de cada uma das atividades realizadas durante a perfuração em distribuições e posteriormente em números aleatórios. Para isso, assumiu-se que os dados podem ser ajustados a uma distribuição triangular. Esse tipo de distribuição é utilizado para populações com descrições subjetivas e dados limitados, o que é o caso deste presente

trabalho. Uma distribuição triangular é definida por três parâmetros:  $a$ ,  $b$  e  $c$ , conforme na Figura 12. O parâmetro  $a$  define o valor em que a distribuição começa e o parâmetro  $b$  define o valor em que a distribuição termina. O parâmetro  $c$  é a moda da distribuição.

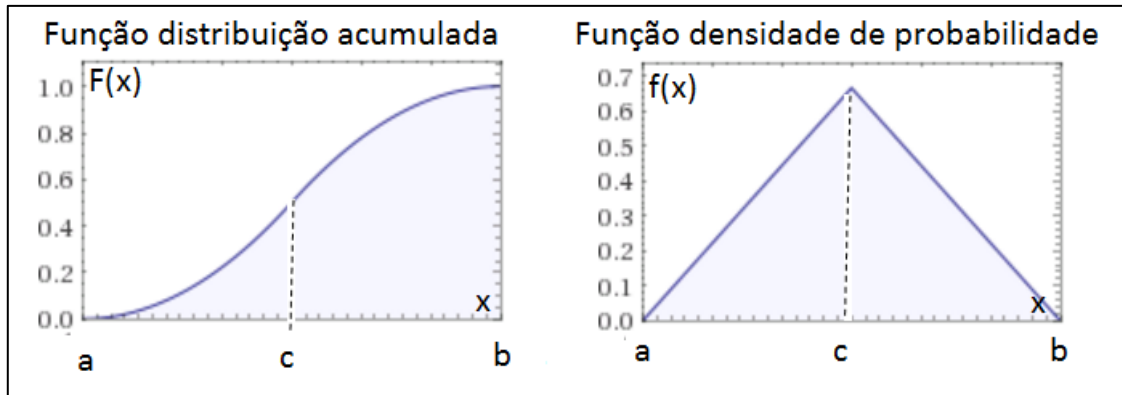


Figura 12. Características de uma distribuição triangular.

O percentil  $P$  é a probabilidade acumulada de uma distribuição correspondente a  $P/100$  da amostra. Para uma distribuição triangular, a relação entre frequência acumulada  $F$  e os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  é dada por:

$$F(x) = \frac{(x - a)^2}{(b - a)(c - a)}, \text{ para } a \leq x \leq c \quad [5.1]$$

$$F(x) = 1 - \frac{(b - x)^2}{(b - a)(b - c)}, \text{ para } c \leq x \leq b. \quad [5.2]$$

Há também uma relação entre a média e os parâmetros dada por:

$$M = \frac{a + b + c}{3} \quad [5.3]$$

Há, então, três incógnitas a serem definidas:  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Estas variáveis podem ser correlacionadas ao percentil P10 ( $F(x)=0,1$ ), ao percentil P75 ( $F(x)=0,75$ ) e à média, perfazendo três equações. Há, portanto, um sistema com três equações e três incógnitas. Entretanto, antes da resolução do sistema, não há informações sobre a localização dos percentis na distribuição, isto é, se os percentis se encontram antes ou depois da moda. Por isso, torna-se necessário repetir o processo de solução do sistema considerando-se os três casos expressos na Figura 13.

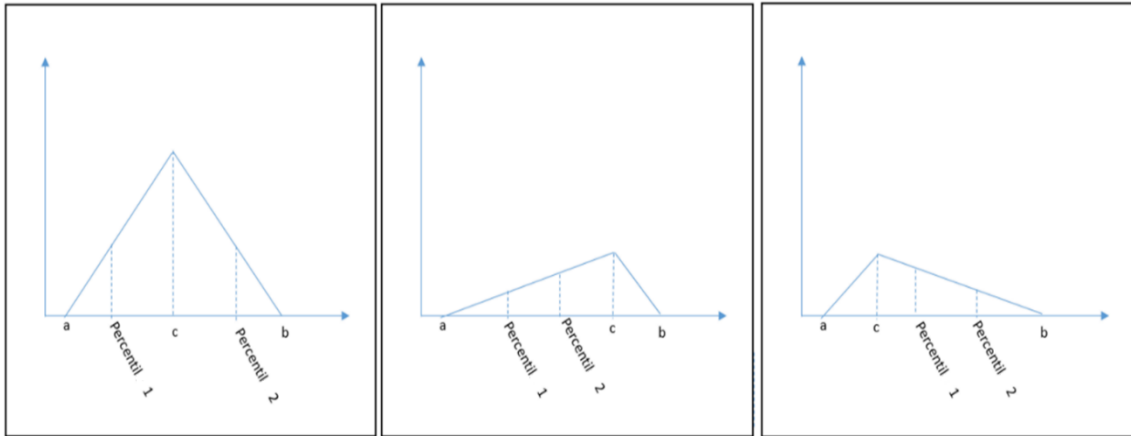


Figura 13. Casos considerados para a resolução do sistema de equações.

Assim, segundo o que for assumido, três diferentes sistemas podem ser resolvidos:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,1 = \frac{(x - a)^2}{(b - a)(c - a)} \\ 0,75 = 1 - \frac{(b - x)^2}{(b - a)(b - c)} \\ M = \frac{a + b + c}{3} \end{array} \right. \quad [5.4]$$

Ou:



$$\begin{cases} 0,1 = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} \\ 0,75 = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} \\ M = \frac{a+b+c}{3} \end{cases} \quad [5.5]$$

Ou:

$$\begin{cases} 0,1 = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} \\ 0,75 = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} \\ M = \frac{a+b+c}{3} \end{cases} \quad [5.6]$$

Ao final da resolução do sistema, o resultado é avaliado, determinando-se se ele é compatível com o que foi assumido.

Como há termos quadráticos, a solução foi obtida pelo método de Newton-Raphson, que apresenta uma abordagem iterativa para a definição das raízes de um sistema não-linear. Segundo URROZ (2004), considera-se inicialmente a expansão em série de Taylor de cada equação do sistema.

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \left(\frac{f''(x_0)}{2!}\right)(x - x_0)^2 + \dots \quad [5.7]$$

Cada raiz da função ocorre quando  $f(x)$  assume valor zero. O método de Newton-Raphson consiste em utilizar recorrentemente a equação [5.7], obtendo cada solução  $k+1$  a partir da equação [5.8]:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad [5.8]$$

Repete-se o processo até que haja convergência, ou seja:

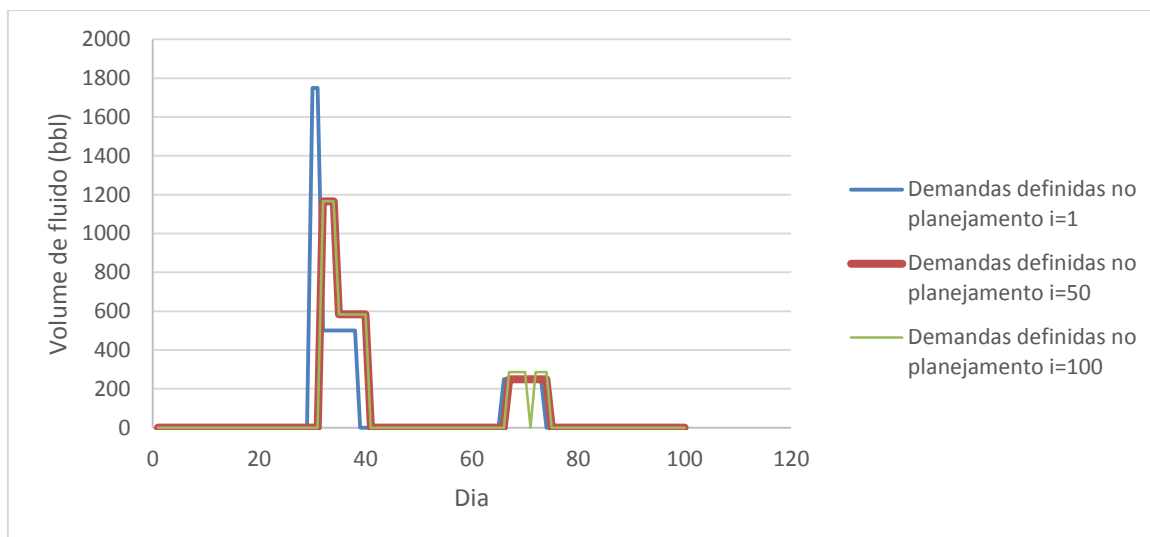
$$|f(x_{k+1})| \leq \varepsilon \quad [5.9]$$

onde  $\varepsilon$  é um parâmetro definido pelo usuário que indica o erro admissível.

Com a determinação dos parâmetros, é possível gerar números aleatórios representando a duração de cada atividade. Para uma certa atividade, ao se realizar o somatório das durações do que ocorreu previamente, pode-se identificar seu tempo de início. Este procedimento é repetido para os planejamentos realizados a cada dia  $i$ . Atividades iniciadas antes do tempo  $i$  são consideradas como já realizadas e, portanto, as suas durações não serão mais alteradas.

Resta então transformar as durações de atividades em estimativas de demandas. Neste trabalho, admitiu-se que o consumo de fluido ocorrerá apenas durante o avanço de profundidade do poço e durante a troca de fluidos. O consumo diário de fluidos nesses dias será igual ao consumo da fase (descontando eventuais volumes utilizados na troca de fluido) dividido pelo número de dias em que ocorre perfuração. Para as fases cujo fluido seja diferente do utilizado na fase anterior, a demanda proveniente da troca de fluido ocorrerá exatamente no início desta fase.

Um exemplo de saída é representado na Figura 14. Nessa figura são expressos os volumes diários para cada dia nos planejamentos  $i=1$ ,  $i=50$  e  $i=100$ . O horizonte de planejamento foi considerado igual a 100 dias.



**Figura 14. Representação gráfica da matriz de demandas utilizada para os testes.**

Por exemplo, a curva azul da Figura 14 representa as estimativas para as demandas diárias segundo o planejamento realizado no dia 1. Segundo esse planejamento, até o dia 30, considera-se que estejam sendo executadas as fases 1 e 2 de construção do poço. Como nestas fases há a utilização de fluido de base água, não considerado neste trabalho, então a demanda diária de fluido sintético nestes dias é nula. Após o dia 31, considera-se que o poço entra na fase 3, passando a utilizar fluidos de base sintética, objeto de análise deste trabalho. Neste caso, sorteou-se uma duração de 2 dias para troca de fluidos, por isso, entre os dias 31 e 32 ocorre a substituição do fluido de base água pelo fluido de base sintética, justificando o pico de demanda diária registrado. Posteriormente, entre os dias 32 e 36, ocorre a perfuração da fase 3, registrando-se um consumo diário referente ao aumento do volume do poço durante estes dias. Após, são registrados alguns dias sem consumo de fluido, o que se justifica pela ocorrência de atividades que não demandam quantidades extras de fluidos, como recolhimento da coluna de perfuração, cimentação e assentamento do revestimento. Por fim, entre os dias 67 e 75, ocorre a perfuração da fase 4, resultado em consumos diários de fluidos.

Para cada planejamento  $i$ , a duração de cada uma das atividades sorteadas pode ser diferente, proporcionando diferenças nas datas de ocorrência destas demandas. A análise é discretizada em dias, por isso todo valor sorteado é arredondado para o inteiro mais próximo, inclusive, dependendo dos valores sorteados, pode-se considerar parada

de perfuração para a troca da broca, como observado no dia 75 pelo planejamento representado pela a curva verde da Figura 14.

## 5.2 Plano de experimentos

Considerou-se 50 poços perfurados nos experimentos. Escolheu-se esta quantidade poços haja vista que eles demandam um tempo para sua perfuração satisfatório para as análises estatísticas. Além disso, a simulação considerando esta quantidade de poços não apresenta tempos computacionais proibitivos.

As datas de início de perfuração, bem como localizações (expressas em latitude e longitude) foram obtidas a partir de ANP (2017b). Os dados foram filtrados, para que apenas fossem considerados poços da Bacia de Campos e perfurados pela maior companhia petrolífera brasileira. Escolheu-se trabalhar com os poços perfurados a partir de 01/01/2010, dada a maior quantidade de poços perfurados neste período em comparação com anos seguintes. Na Figura 15, explicita-se as localizações geográficas destes pontos. Na Tabela 1, estão sumarizados os dados dos poços considerados no experimento e o porto.

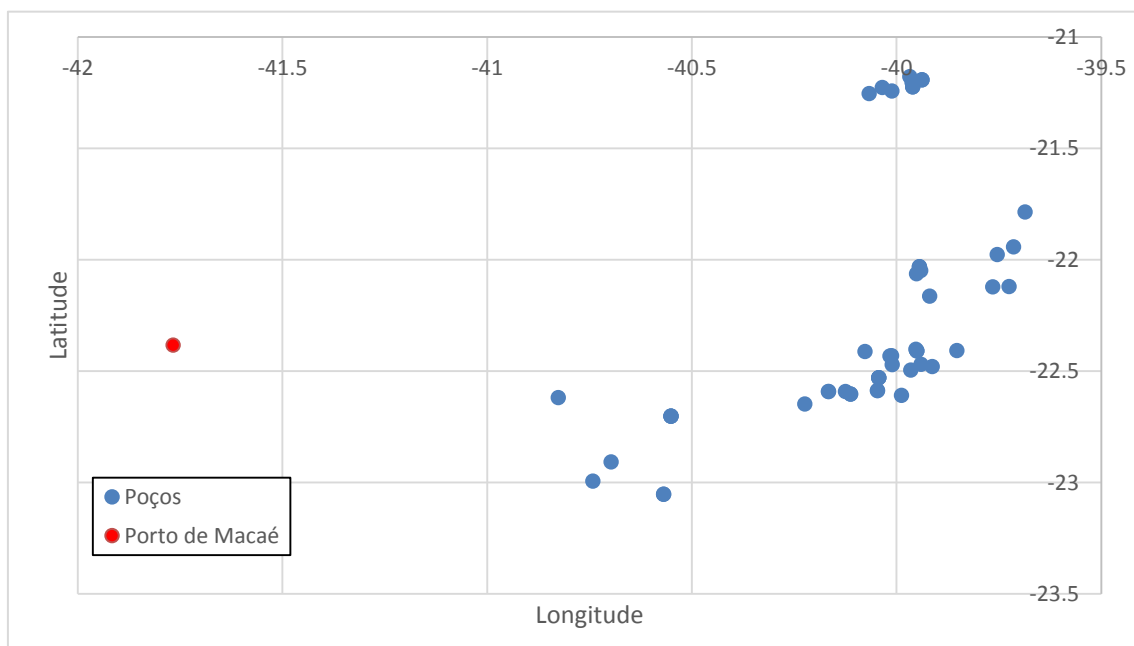


Figura 15. Localização dos poços e porto considerados nos experimentos

**Tabela 1. Dados dos poços considerados nos experimentos.**

Nome Poço ANP	Data Início Perfuração	Latitude	Longitude	Nome Poço ANP	Data Início Perfuração	Latitude	Longitude
1BRSA797RJS	08/01/2010	-22.61938389	-40.8261	7MLS93HPRJS	01/04/2010	-22.60283139	-40.1125
7MLL62HPRJS	12/01/2010	-22.46986056	-39.9398	3BRSA823RJS	16/04/2010	-22.99341389	-40.742
9MLS166DRJS	12/01/2010	-22.52995889	-40.0432	7MLL52HPRJS	20/04/2010	-22.48049278	-39.9124
9MLL45DRJS	23/01/2010	-22.40970389	-39.9506	8CHT10HESS	25/04/2010	-21.17915861	-39.9677
8AB118HPRJS	24/01/2010	-22.16363028	-39.9193	7AB117HRJS	29/04/2010	-22.04887472	-39.9409
7MRL203HRJS	25/01/2010	-22.47133528	-40.0101	7BR67HPRJS	02/05/2010	-22.59205694	-40.1664
1BRSA805RJS	04/02/2010	-22.90805417	-40.6972	9MRL204DRJS	03/05/2010	-22.43189056	-40.0157
7CHT9HESS	11/02/2010	-21.20480611	-39.9616	9MA30DRJS	06/05/2010	-22.70170694	-40.5507
7MLS167HPRJS	12/02/2010	-22.52995889	-40.0432	9BFR4DESS	17/05/2010	-21.22445611	-39.9601
9MLS92DRJS	13/02/2010	-22.60283139	-40.1125	8JUB23HAESS	01/06/2010	-21.25487194	-40.0666
6BRSA806RJS	14/02/2010	-22.64714694	-40.2236	8MLS143HRJS	02/06/2010	-22.59202222	-40.125
1BRSA807DRJS	16/02/2010	-23.05266472	-40.5692	7MRL205HPRJS	02/06/2010	-22.43105722	-40.0123
9BFR2DESS	16/02/2010	-21.19289583	-39.9381	8BFR5HPESS	09/06/2010	-21.22445611	-39.9601
7MLL46HPRJS	17/02/2010	-22.40970389	-39.9506	9ABL77DRJS	11/06/2010	-22.12204889	-39.7651
7MLL53HRJS	17/02/2010	-22.4953525	-39.965	9AB102DPRJS	16/06/2010	-22.03167667	-39.9438
1BRSA807DARJS	22/02/2010	-23.05266472	-40.5692	7MA31HPRJS	16/06/2010	-22.70170694	-40.5507
6BRSA811DRJS	26/02/2010	-22.12007556	-39.7252	9MLS168DRJS	20/06/2010	-22.58701472	-40.0467
9RO95DRJS	01/03/2010	-21.97759611	-39.7543	7JUB19HESS	25/06/2010	-21.24306944	-40.0115
7RO92DRJS	05/03/2010	-21.94336444	-39.7143	7AB103HPRJS	28/06/2010	-22.03167667	-39.9438
7MLS167HPRJS	07/03/2010	-22.52995889	-40.0432	7MA31HPRJS	28/06/2010	-22.70170694	-40.5507
7BFR3HPESS	09/03/2010	-21.19289583	-39.9381	8JUB20HESS	02/07/2010	-21.22764056	-40.0351
7MLL49HRJS	11/03/2010	-22.40282833	-39.9524	1BRSA847ESS	02/07/2010	-21.78552528	-39.686
6BRSA817RJS	14/03/2010	-22.40812972	-39.8527	9MLS154DRJS	04/07/2010	-22.60946472	-39.9877
7AB114HRJS	22/03/2010	-22.06364972	-39.9513	9MLS162DRJS	06/07/2010	-22.58701472	-40.0467
9BR66DRJS	31/03/2010	-22.59205694	-40.1664	7MRL207HRJS	09/07/2010	-22.41244583	-40.0768

Segundo THOMAS (2001), a quantidade de fases depende das características das zonas perfuradas e da profundidade do poço, havendo geralmente entre três e quatro fases, chegando a até oito fases em situações mais raras. Assim, considerou-se uma boa aproximação poços com 4 fases. Os valores das demandas de cada fase em barris são baseados em um poço tipo de uma importante companhia petrolífera brasileira e estão na Tabela 2. Neste trabalho, apenas as demandas de base sintética serão consideradas durante a análise.

Tabela 2. Consumo de fluidos considerado em cada fase.

Fase	Consumo de base água (bbl)	Consumo de base sintética (bbl)
1	1500	
2	2000	
3		3500 (trocados) + 3500(consumidos)
4		2000

Segundo ZAMORA *et al.* (2000), sondas de perfuração possuem capacidades nos tanques para fluidos entre 12.000 bbl e 16.000 bbl. Buscando-se simular o pior cenário, neste trabalho, considerou-se uma capacidade homogênea para cada sonda de 12.000 bbl.

Considerou-se um horizonte de tempo de 200 dias. Foi feita esta escolha já que, com este horizonte, ainda consegue-se terminar a simulação com a operação de perfuração em plena atividade, não afetando estatísticas.

Segundo ZAMORA *et al.* (2000), barcos de suprimento de fluidos apresentam capacidades de 3.000 bbl a 6.000 bbl. Buscando-se simular o pior cenário, considerou-se que a frota seria homogênea, com cada barco contando com capacidade de 3.000 bbl. Considerou-se que os barcos apresentam velocidades médias diferentes para o trecho porto-unidade, unidade-unidade e unidade-porto, baseados em valores reais utilizados por uma companhia petrolífera. O ponto de ressuprimento foi considerado 500 bbl. Além disso, considerou-se que os barcos podem ficar no máximo 21 dias navegando, devido à necessidade de troca de turma. Considerou-se ainda que o *backload* pode ser recolhido no máximo 20 dias após o final da perfuração.

A simulação foi programada em R. Durante a geração de demandas, foi utilizado o pacote *rootsolve* para encontrar a solução do sistema de equações e o pacote *mc2d* para gerar números aleatórios segundo os parâmetros da distribuição triangular. Além disso, utilizou-se o pacote *WriteXLS* para gerar saídas em *Microsoft Excel*. Na Figura 16 e na Figura 17, é apresentada a interface do programa desenvolvido, destacando-se o trecho do código onde encontram-se os parâmetros que precisam ser definidos pelo usuário.

```

time_begin<-proc.time()
require(WriteXLS)

#####Definition of parameters#####
Number_of_replications<-1

#Mode: 1=Generate standard demands
#       2=Generate demands with emergency occurrence
#       3=Read demands from external CSV file
#       4=Read demands from external CSV file and add emergencies
Mode<-1

#Day of emergency: 1=Random
#                   2=First day of phase 3 drilling
#                   3=Middle of phase 3 drilling
#                   4=Last day of phase 3 drilling
#                   5=First day of phase 4 drilling
#                   6=Middle of phase 4 drilling
#                   7=Last day of phase 4 drilling
#                   8=Choose a day on phase 3
Day_of_emergency<-3
Day_number<-9
Emergency_volume<-5000

#Delivery days: 1=every 3 days
#               2=on the beginning of each phase
Delivery_days<-1

#We need to define number of maritime units attended by warehouse:
#Note: If we are importing demands data from CSV file, this
#number should be equal to the number of CSV files
Quantity_MU<-50

#We need to define parameters of maritime unit:
Safety_stock_level_MU<-6
Add_virtual_demands<-0
Capacity_MU<-12000
Lead_time_MU<-4
Safety_stock<-0

```

Figura 16. Parte 1 da interface do programa desenvolvido.

```

#We need to define parameters of warehouse:
Safety_stock_level_warehouse<-6
Capacity_warehouse<-50000
Lead_time_warehouse<-5

#We must define if emergency deliveries can occur, in case of shortage
Emergency_deliveries_allowed<-0

#Planning time horizon
Time_horizon<-200
Time_horizon_well<-100

#Parameters of the PSV(Speed in Knots)
Speed_Port_MU<-7.6
Speed_MU_MU<-5.2
Speed_MU_Port<-7.9
Number_of_PSV<-14
unique_MU_per_trip<-0
Capacity_PSV<-3000
resupply_point<-500
max_days_navigating<-21
max_days_backload<-20

#Parameters of the routing
Latitude_Port<-(-22.383761)
Longitude_Port<-(-41.767097)

#We also need to define file path where input and output files should be
File_path<-'C:/Users/Rafael/iCloudDrive/dissertacao/experimentos macbook

```

Figura 17. Parte 2 da interface do programa desenvolvido.

Busca-se fazer uma análise de sensibilidade para o tamanho da frota. Assim, considerou-se 6 cenários com as seguintes frotas: 11, 12, 13, 14, 15 ou 16 barcos. Escolheu-se estes tamanhos de frota objetivando a análise de um cenário em que todas as replicações resultam em falta de produtos, um cenário em que em nenhuma replicação há faltas de produtos, além de todos os cenários intermediários. Foram realizadas 10 replicações, totalizando-se assim 60 experimentos diferentes

Para executar as simulações foram utilizadas três máquinas, objetivando-se um menor tempo computacional e a análise de como a simulação se comporta em diferentes configurações. A máquina 1 possui a seguinte configuração: Intel Core I7, com 8GB de memória RAM. A máquina 2 possui a seguinte configuração: Processador Intel Core i5, com 8GB de memória RAM. A máquina 3 possui a seguinte configuração: Processador Intel Core 2 Duo, com 4GB de memória RAM.



Na Tabela 3 este plano de experimentos é explicitado.

**Tabela 3. Plano de experimentos.**

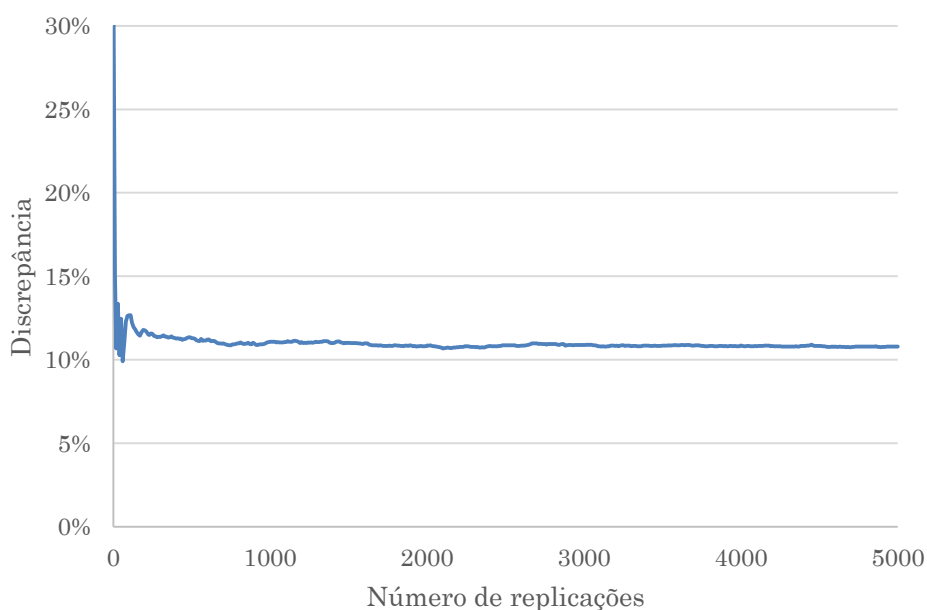
	11 PSVs	12 PSVs	13 PSVs	14 PSVs	15 PSVs	16 PSVs
Replicação 1	Experimento 1 Máquina 1 Experimentos em execução: 1	Experimento 2 Máquina 1 Experimentos em execução: 2	Experimento 3 Máquina 1 Experimentos em execução: 3	Experimento 4 Máquina 1 Experimentos em execução: 4	Experimento 5 Máquina 1 Experimentos em execução: 5	Experimento 6 Máquina 1 Experimentos em execução: 6
Replicação 2	Experimento 7 Máquina 2 Experimentos em execução: 7	Experimento 8 Máquina 2 Experimentos em execução: 8	Experimento 9 Máquina 2 Experimentos em execução: 9	Experimento 10 Máquina 2 Experimentos em execução: 10	Experimento 11 Máquina 2 Experimentos em execução: 11	Experimento 12 Máquina 2 Experimentos em execução: 12
Replicação 3	Experimento 13 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18	Experimento 14 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18	Experimento 15 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18	Experimento 16 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18	Experimento 17 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18	Experimento 18 Máquina 2 Experimentos em execução: 13, 14, 15, 16, 17, 18
Replicação 4	Experimento 19 Máquina 3 Experimentos em execução: 19 e 25	Experimento 20 Máquina 3 Experimentos em execução: 20 e 26	Experimento 21 Máquina 3 Experimentos em execução: 21 e 27	Experimento 22 Máquina 3 Experimentos em execução: 22 e 28	Experimento 23 Máquina 3 Experimentos em execução: 23 e 29	Experimento 24 Máquina 3 Experimentos em execução: 24 e 30
Replicação 5	Experimento 25 Máquina 3 Experimentos em execução: 19 e 25	Experimento 26 Máquina 3 Experimentos em execução: 20 e 26	Experimento 27 Máquina 3 Experimentos em execução: 21 e 27	Experimento 28 Máquina 3 Experimentos em execução: 22 e 28	Experimento 29 Máquina 3 Experimentos em execução: 23 e 29	Experimento 30 Máquina 3 Experimentos em execução: 24 e 30
Replicação 6	Experimento 31 Máquina 2 Experimentos em execução: 31, 37 e 43	Experimento 32 Máquina 2 Experimentos em execução: 32, 38 e 44	Experimento 33 Máquina 2 Experimentos em execução: 33, 39 e 45	Experimento 34 Máquina 2 Experimentos em execução: 34, 40 e 46	Experimento 35 Máquina 2 Experimentos em execução: 35, 41 e 47	Experimento 36 Máquina 2 Experimentos em execução: 36, 42 e 48
Replicação 7	Experimento 37 Máquina 2 Experimentos em execução: 31, 37 e 43	Experimento 38 Máquina 2 Experimentos em execução: 32, 38 e 44	Experimento 39 Máquina 2 Experimentos em execução: 33, 39 e 45	Experimento 40 Máquina 2 Experimentos em execução: 34, 40 e 46	Experimento 41 Máquina 2 Experimentos em execução: 35, 41 e 47	Experimento 42 Máquina 2 Experimentos em execução: 36, 42 e 48
Replicação 8	Experimento 43 Máquina 2 Experimentos em execução: 31, 37 e 43	Experimento 44 Máquina 2 Experimentos em execução: 32, 38 e 44	Experimento 45 Máquina 2 Experimentos em execução: 33, 39 e 45	Experimento 46 Máquina 2 Experimentos em execução: 34, 40 e 46	Experimento 47 Máquina 2 Experimentos em execução: 35, 41 e 47	Experimento 48 Máquina 2 Experimentos em execução: 36, 42 e 48
Replicação 9	Experimento 49 Máquina 1 Experimentos em execução: 49 e 55	Experimento 50 Máquina 1 Experimentos em execução: 50 e 56	Experimento 51 Máquina 1 Experimentos em execução: 51 e 57	Experimento 52 Máquina 1 Experimentos em execução: 52 e 58	Experimento 53 Máquina 1 Experimentos em execução: 53 e 59	Experimento 54 Máquina 1 Experimentos em execução: 54 e 60
Replicação 10	Experimento 55 Máquina 1 Experimentos em execução: 49 e 55	Experimento 56 Máquina 1 Experimentos em execução: 50 e 56	Experimento 57 Máquina 1 Experimentos em execução: 51 e 57	Experimento 58 Máquina 1 Experimentos em execução: 52 e 58	Experimento 59 Máquina 1 Experimentos em execução: 53 e 59	Experimento 60 Máquina 1 Experimentos em execução: 54 e 60

## 6 Resultados

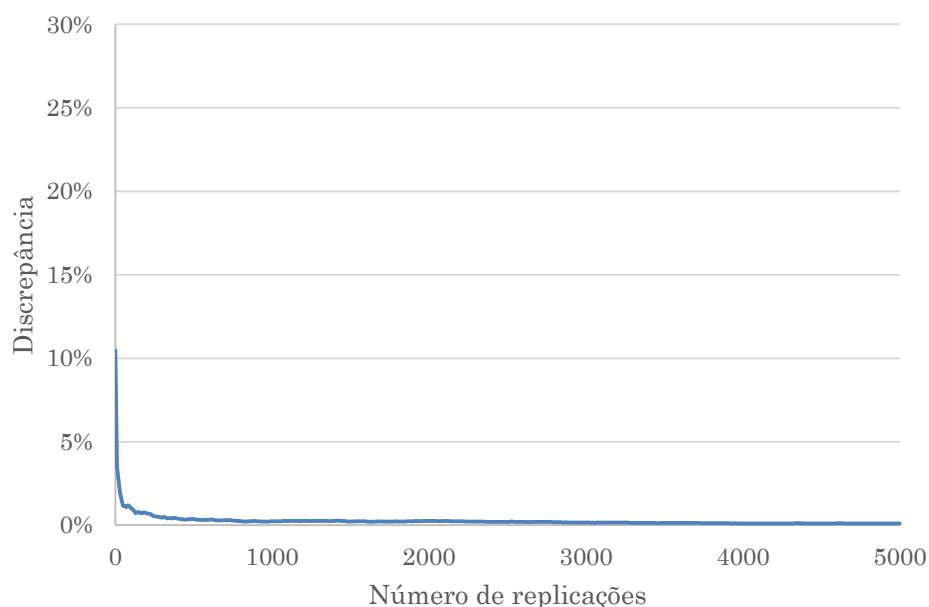
Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através da experimentação. Inicialmente, a estratégia adotada para a criação de instâncias será avaliada e seus resultados serão validados. Ao final, o foco serão os resultados da ferramenta de simulação, propiciando uma análise tática da operação relativa à definição do tamanho da frota.

### 6.1 Validação

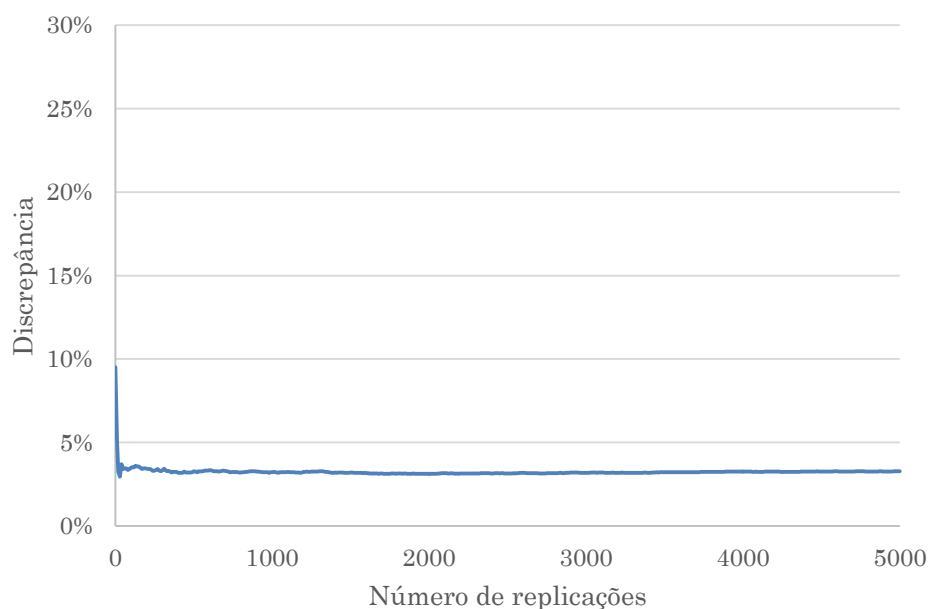
Para avaliar a metodologia, o procedimento de geração de demandas foi repetido diversas vezes e os valores das médias e percentis obtidas a partir desta simulação foram comparados com os valores originais. A partir disso, foi possível avaliar a discrepância entre valores simulados e valores originais. Os resultados, de acordo com o número de replicações, estão registrados nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20.



**Figura 18. Discrepância entre o valor simulado e o real para o P10**



**Figura 19. Discrepância entre o valor simulado e o real para o percentil 2.**

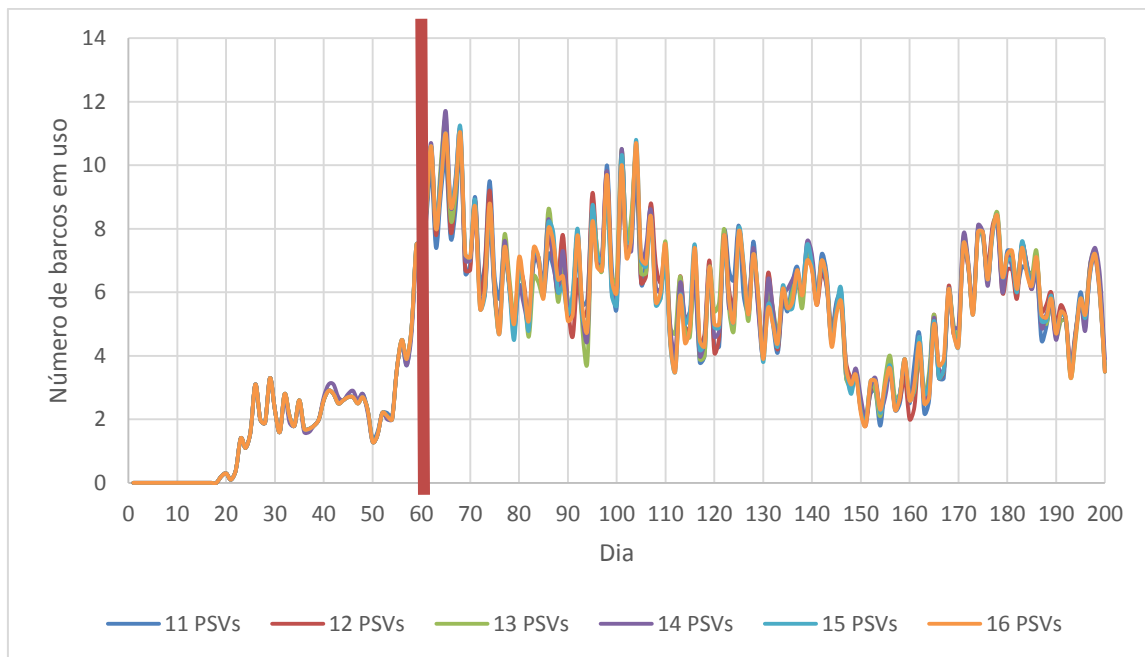


**Figura 20. Discrepância entre os valores simulados e os reais para a média.**

Após 5.000 replicações, a discrepância para a média é de 0,1%, para o P10 é de 10,78% e de 3,27% para o P75. Inclusive, com muito menos replicações, já existem valores semelhantes. Dado estes resultados, pode-se considerar que a metodologia apresentou bons resultados e representa bem a realidade.

## 6.2 Análise dos resultados

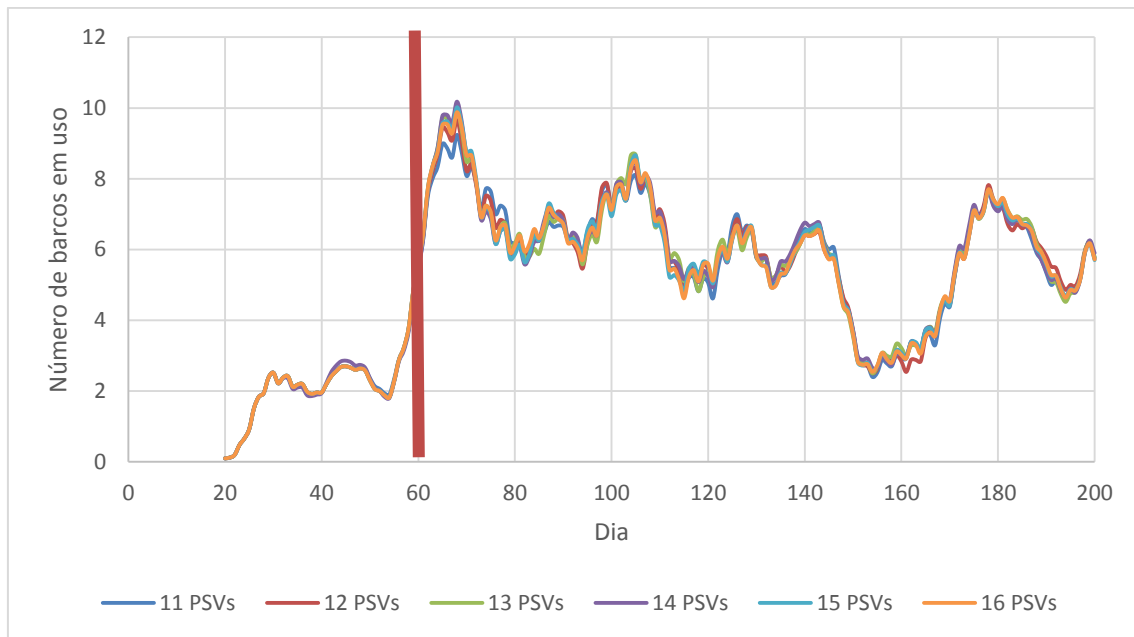
Para a obtenção de estatísticas representativas da realidade, a análise deve ignorar quaisquer resultados anteriores ao tempo de aquecimento, portanto, é primordial a determinação deste parâmetro. Para isso, deve-se analisar alguma variável da operação do processo simulado, buscando-se o dia em que os valores se estabilizam, neste trabalho optou-se por utilizar o número de barcos em atividade a cada dia para determinar o tempo de aquecimento. Na Figura 21 é apresentada, para cada cenário, a média do número de barcos em atividade a cada dia, considerando as dez replicações.



**Figura 21. Média do número de barcos em atividade a cada dia para cada cenário.**

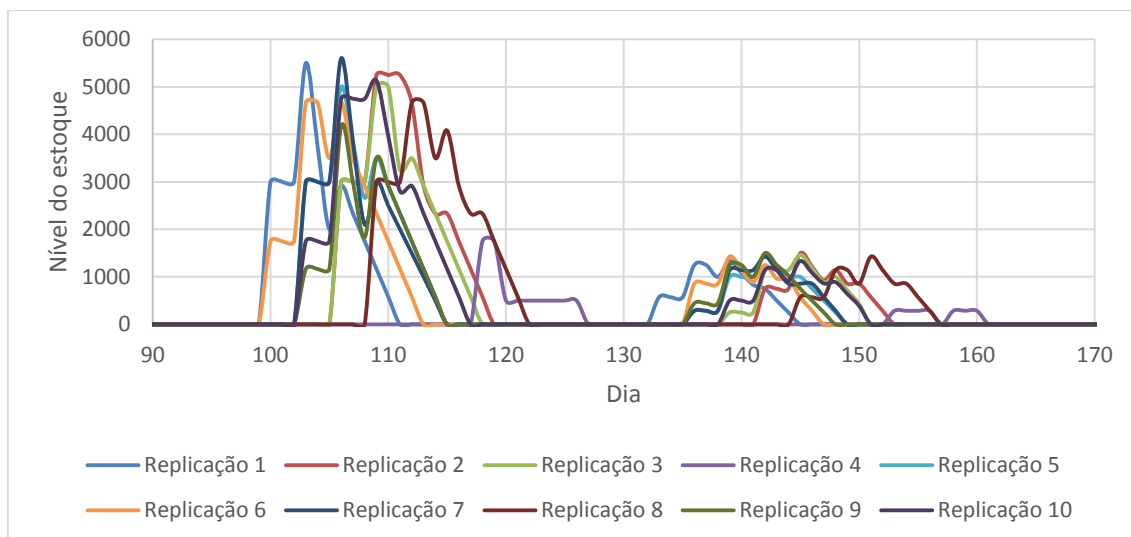
Para identificar a estabilização deste parâmetro, recorreu-se a análise do comportamento da média móvel, conforme o método de Welch, explicitado em GOMES *et al.* (2011). Considera-se que o tempo de aquecimento foi atingido a partir do momento em que os valores da média móvel se estabilizam. Na Figura 22, para cada instante de tempo, são apresentadas as médias móveis considerando as 10 observações

anteriores. Nota-se por inspeção visual que há uma estabilização dos valores para todos os cenários considerados a partir do dia 60, por isso foi estabelecido o tempo de aquecimento como 60 dias. Visualmente, nos dados brutos presentes na Figura 21 o mesmo também pode ser observado.



**Figura 22. Análise do número de barcos em atividade a partir da média móvel.**

É possível obter uma grande variedade de resultados a partir da ferramenta desenvolvida. Podem ser obtidos, para cada sonda, níveis de estoque e quantidades requeridas, por exemplo, como explicita-se na Figura 23, onde são apresentados os resultados obtidos para nível de estoque da sonda que atende ao poço 25 para cada uma das replicações, considerando o cenário de uma frota de 16 barcos. Há dois picos no estoque, em resposta aos consumos nas fases 3 e 4 da construção do poço. Devido à estocasticidade do dia de ocorrência das demandas, os níveis de estoque apresentam variações relacionadas sobretudo a sua data de ocorrência. Resultados completos para todos os 50 poços considerados na replicação 1 do cenário com 16 barcos são apresentados no Anexo A. Resultados para todas as dez replicações foram obtidos, mas optou-se por apresentar neste anexo apenas uma destas devido à sua grande extensão.

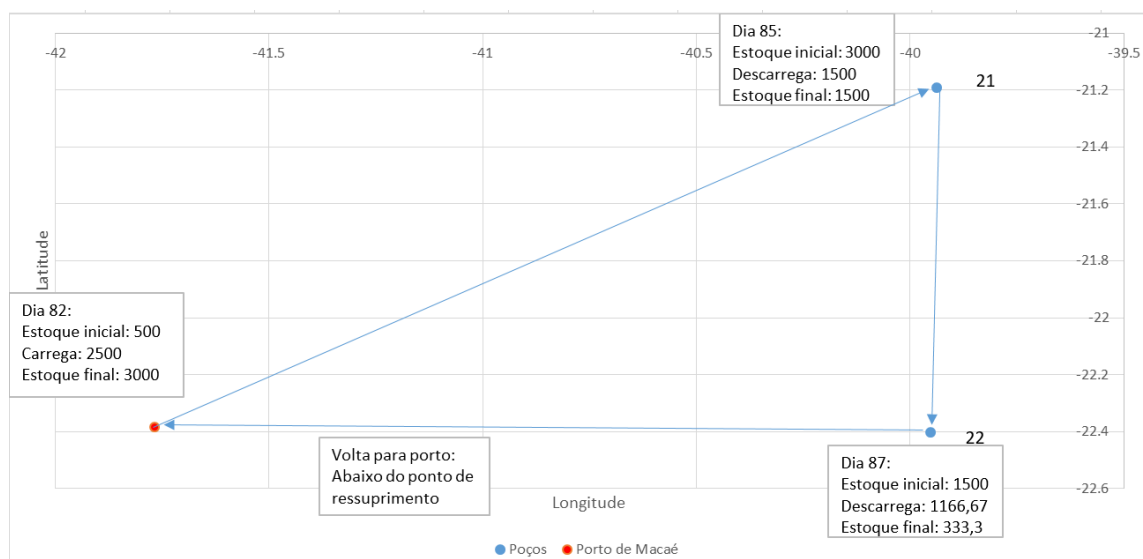


**Figura 23. Níveis de estoque por dia para a sonda que abastece o poço 25.**

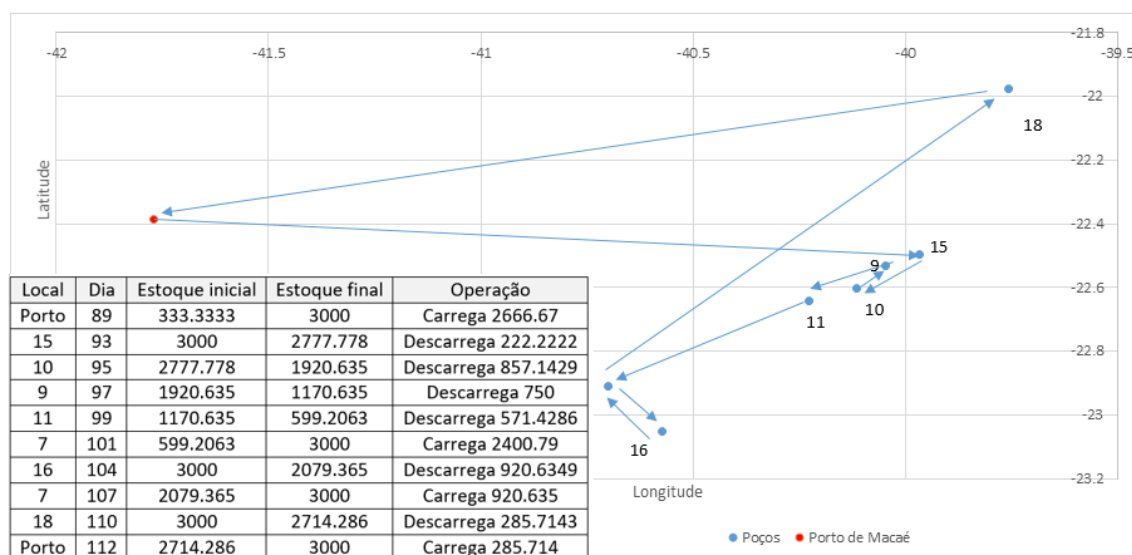
Da mesma forma, a ferramenta torna possível determinar planejamentos das viagens dos barcos de apoio. É possível obter os arcos percorridos em cada viagem, bem como a quantidade entregue ou recolhida em cada local. Por exemplo, explicita-se na Figura 24 e Figura 25 algumas das viagens realizadas pelo barco 1, na primeira replicação do cenário de 16 barcos.

Na Figura 24 é apresentada a rota percorrida pelo barco 1 desde o dia 82 até o dia 89. Neste caso, o barco é abastecido no porto e realiza dois atendimentos, nos poços 21 e 22. Após o segundo atendimento, o nível de estoque na embarcação fica abaixo do ponto de ressuprimento, retornando-se ao porto.

Na Figura 25, uma rota percorrida pelo barco 1 desde o dia 89 até o dia 112, assim como o estoque desta embarcação ao longo de suas paradas. Nos primeiros dias da rota, há o carregamento dos tanques do barco no porto e atendimento a algumas unidades. No dia 101, o barco é atendido ao poço 7 para recolher *backload*, completando os tanques do barco. A seguir, continua-se normalmente os atendimentos de *load* e *backload*. No dia 112, o limite de dias navegando é atingido e a embarcação deve voltar ao porto.



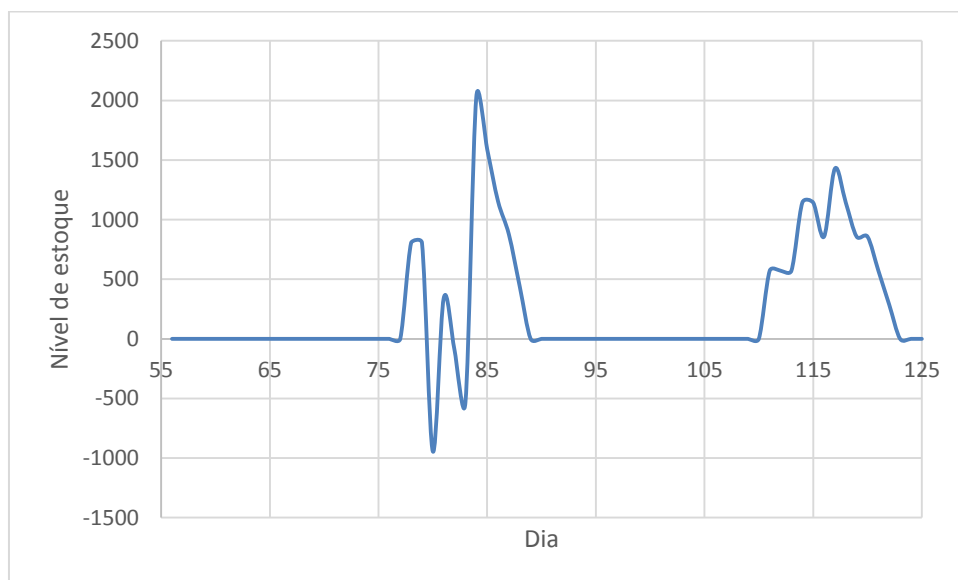
**Figura 24. Rotas percorridas pelo barco 1 desde o dia 84 até o dia 89.**



**Figura 25. Rota percorrida pelo barco 1 desde o dia 89 até o dia 112.**

Resultados completos para todos os 16 barcos na replicação 1 do cenário de 16 barcos são apresentados no Anexo B. Apesar de resultados para todas as replicações estarem disponíveis, optou-se por apresentar apenas uma delas devido à grande extensão dos resultados.

O objetivo primordial deste trabalho é, após a simulação, escolher a partir dos 6 cenários qual tamanho de frota deveria ser escolhido. Como fluidos de perfuração são primordiais e é imprescindível que não haja falta, deve ser escolhido um tamanho de frota que garanta 100% de atendimento, considerando a estocasticidade da demanda representada pelas 10 replicações realizadas. Considera-se que houve falta se em algum dia nível de estoque de alguma sonda assumiu algum valor negativo. Para todos os resultados, desconsiderou-se qualquer resultado anterior ao tempo de aquecimento. Por exemplo, para a replicação 6 do cenário com frota de 11 embarcações, em 0,477% dos dias há faltas. A sonda que atende ao poço 16 apresenta níveis de estoques negativos, devido à falta de capacidade de atendimento pela frota considerada no cenário. Na Figura 26, este resultado é explicitado.



**Figura 26. Nível de estoque por dia para o caso de uma sonda com falta de produtos.**

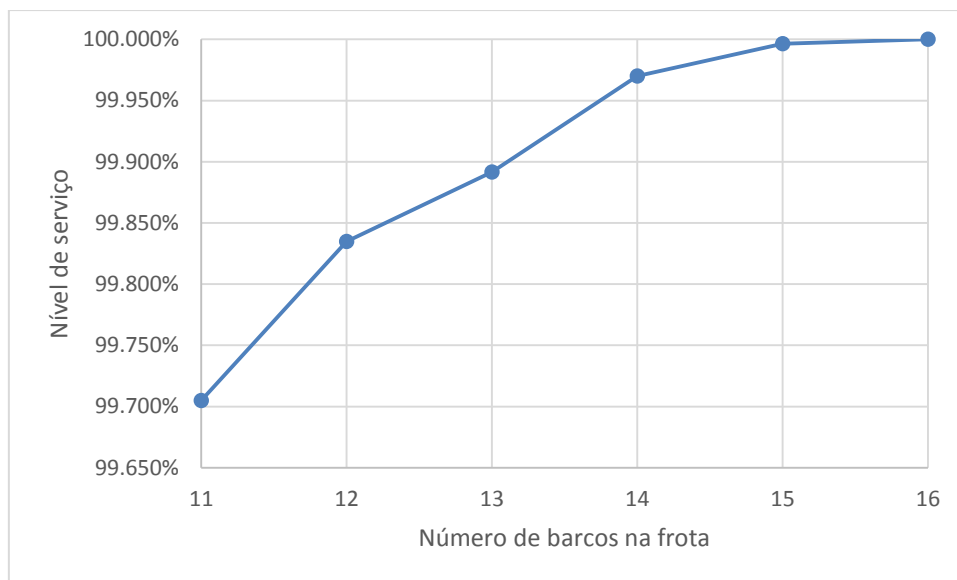
A mesma análise foi realizada em todos os experimentos. Na Tabela 4, explicitam-se estes resultados.



**Tabela 4. Análise da ocorrência de faltas de produtos nos experimentos.**

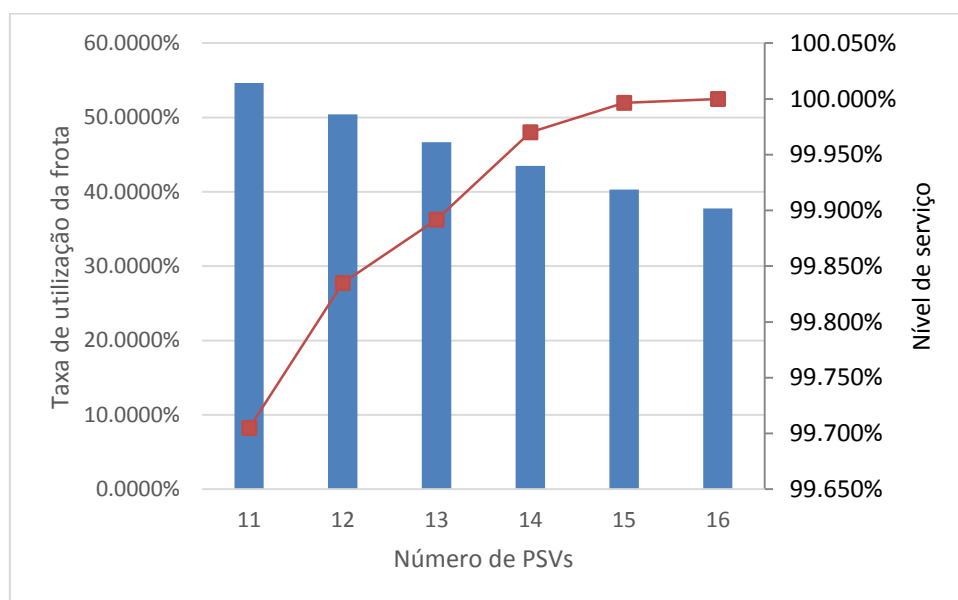
	<b>11 PSVs</b>	<b>12 PSVs</b>	<b>13 PSVs</b>	<b>14 PSVs</b>	<b>15 PSVs</b>	<b>16 PSVs</b>
Replicação 1	Experimento 1 Há falta	Experimento 2 Há falta	Experimento 3 Há falta	Experimento 4 Há falta	Experimento 5 Pedidos atendidos	Experimento 6 Pedidos atendidos
Replicação 2	Experimento 7 Há falta	Experimento 8 Há falta	Experimento 9 Pedidos atendidos	Experimento 10 Pedidos atendidos	Experimento 11 Pedidos atendidos	Experimento 12 Pedidos atendidos
Replicação 3	Experimento 13 Há falta	Experimento 14 Há falta	Experimento 15 Há falta	Experimento 16 Pedidos atendidos	Experimento 17 Pedidos atendidos	Experimento 18 Pedidos atendidos
Replicação 4	Experimento 19 Há falta	Experimento 20 Há falta	Experimento 21 Há falta	Experimento 22 Pedidos atendidos	Experimento 23 Pedidos atendidos	Experimento 24 Pedidos atendidos
Replicação 5	Experimento 25 Há falta	Experimento 26 Há falta	Experimento 27 Pedidos atendidos	Experimento 28 Pedidos atendidos	Experimento 29 Pedidos atendidos	Experimento 30 Pedidos atendidos
Replicação 6	Experimento 31 Há falta	Experimento 32 Há falta	Experimento 33 Há falta	Experimento 34 Pedidos atendidos	Experimento 35 Pedidos atendidos	Experimento 36 Pedidos atendidos
Replicação 7	Experimento 37 Há falta	Experimento 38 Pedidos atendidos	Experimento 39 Pedidos atendidos	Experimento 40 Pedidos atendidos	Experimento 41 Pedidos atendidos	Experimento 42 Pedidos atendidos
Replicação 8	Experimento 43 Há falta	Experimento 44 Há falta	Experimento 45 Há falta	Experimento 46 Pedidos atendidos	Experimento 47 Pedidos atendidos	Experimento 48 Pedidos atendidos
Replicação 9	Experimento 49 Há falta	Experimento 50 Há falta	Experimento 51 Há falta	Experimento 52 Há falta	Experimento 53 Pedidos atendidos	Experimento 54 Pedidos atendidos
Replicação 10	Experimento 55 Há falta	Experimento 56 Há falta	Experimento 57 Há falta	Experimento 58 Há falta	Experimento 59 Há falta	Experimento 60 Pedidos atendidos

Define-se o nível de serviço como a percentagem dos dias até o final da perfuração em que o estoque apresenta valores maiores ou iguais a zero, ou seja, dias em que não há falta. Na Figura 27, mostra-se o nível de serviço médio para cada um dos cenários, trata-se de uma curva ascendente, já que quanto maior a frota, mais difícil será a ocorrência de faltas em alguma unidade marítima. Com 16 barcos, o nível de serviço chega a 100%, ou seja, não há faltas de produtos. A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que a frota ideal deve possuir 16 embarcações, visto que não se deseja que haja a ocorrência de faltas de produtos. Segundo UGLANE *et al.* (2012), aluguéis de PSVs ficam entre US\$25.000,00 e US\$35.000,00 por dia. Assim, a frota definida neste trabalho apresenta um custo de até US\$560.000,00 por dia.



**Figura 27. Nível de serviço obtido para cada um dos cenários.**

Entretanto, a robustez devido a exigência de não haver faltas de produtos faz com que a taxa de utilização média dos barcos seja baixa. Na Figura 28, explicita-se a taxa de utilização para cada um dos cenários considerados. Considera-se que o barco esteja sendo utilizado caso ele esteja realizando alguma viagem ou esteja realizando atendimento a alguma unidade ou ao porto.

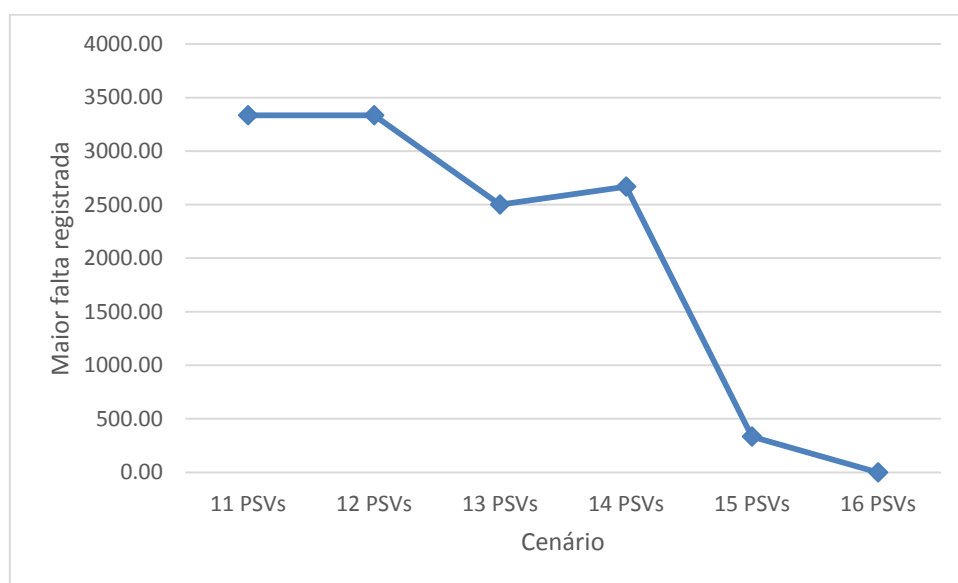


**Figura 28. Taxa de utilização da frota para cada um dos cenários.**

A taxa de utilização varia entre 54,64% no cenário com frota de 11 PSVs e 37,76% no cenário com 16 PSVs. Estes valores baixos podem ser explicados pela heterogeneidade na quantidade de embarcações demandadas a cada dia, como pode ser observado na Figura 21. Existem épocas em que um número maior de poços está sendo perfurado, exigindo-se maiores quantidades de embarcações para suprir toda a operação do que em outras épocas.

Uma forma de tornar a operação mais econômica consiste na possibilidade de compartilhamento da frota de embarcações fluideiras com outras atividades da companhia, como o abastecimento a unidades de produção. Outra forma, consiste na utilização do mercado *spot*, que, entretanto, não é bem desenvolvido no Brasil.

Da mesma forma, pode-se manter nas sondas quantidades reservas de fluidos, para que se possa evitar faltas. Uma estratégia poderia ser manter nas sondas quantidades reservas iguais ou superiores à maior falta registrada em cada um dos cenários observados, que são explicitadas na Figura 29. Portanto, caso seja viável manter um estoque reserva de 333,33 bbl na sonda, pode-se tornar viável a utilização de uma frota de 15 embarcações, resultando-se em uma economia de US\$35.000,00 por dia.



**Figura 29. Maior falta registrada para cada um dos cenários.**

Na Tabela 5, explicitam-se os tempos computacionais demandados em cada um dos 60 experimentos. Eles apresentam resultados mais altos do que os esperados, o que pode indicar a necessidade de trabalhos futuros relacionados a sua otimização.

**Tabela 5. Tempo computacional exigido em cada um dos experimentos (em segundos).**

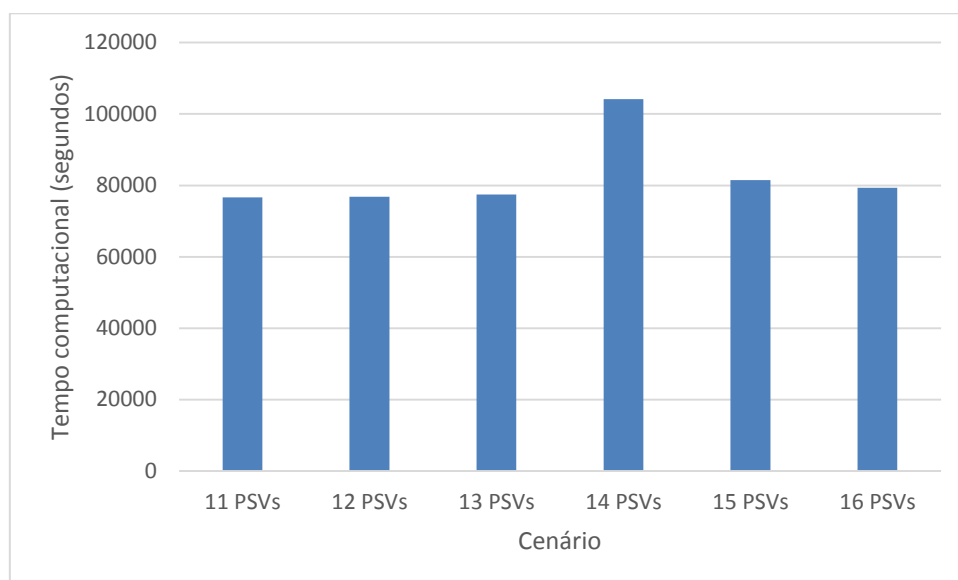
	<b>11 PSVs</b>	<b>12 PSVs</b>	<b>13 PSVs</b>	<b>14 PSVs</b>	<b>15 PSVs</b>	<b>16 PSVs</b>
<b>Replicação1</b>	56.867	52.762	51.659	85.013	52.216	63.394
<b>Replicação 2</b>	44.008	46.403	44.399	61.121	46.185	48.706
<b>Replicação 3</b>	122.129	122.530	122.709	137.828	123.293	123.404
<b>Replicação 4</b>	94.290	96.677	96.528	130.051	95.220	98.884
<b>Replicação 5</b>	94.217	96.486	96.460	130.155	95.166	99.184
<b>Replicação 6</b>	64.464	67.615	66.713	92.536	68.026	68.372
<b>Replicação 7</b>	64.240	67.881	66.938	92.589	67.757	68.141
<b>Replicação 8</b>	64.427	67.990	66.671	92.359	69.053	68.181
<b>Replicação 9</b>	80.552	75.057	81.402	110.096	98.566	77.421
<b>Replicação 10</b>	80.764	74.771	81.130	109.828	98.885	77.526

Na Tabela 6, é apresentado o tempo computacional que foi exigido para a geração da instância aleatória em cada uma das 10 replicações.

**Tabela 6. Tempo computacional exigido para geração da instância aleatória.**

	<b>Tempo computacional (segundos)</b>
<b>Replicação1</b>	568
<b>Replicação 2</b>	408
<b>Replicação 3</b>	423
<b>Replicação 4</b>	993
<b>Replicação 5</b>	993
<b>Replicação 6</b>	620
<b>Replicação 7</b>	620
<b>Replicação 8</b>	620
<b>Replicação 9</b>	893
<b>Replicação 10</b>	893

A média do tempo computacional exigido em cada cenário é apresentado na Figura 30. Conforme aumenta a quantidade de embarcações na frota, aumenta-se a complexidade do programa, havendo-se assim uma tendência de aumento no tempo computacional exigido.

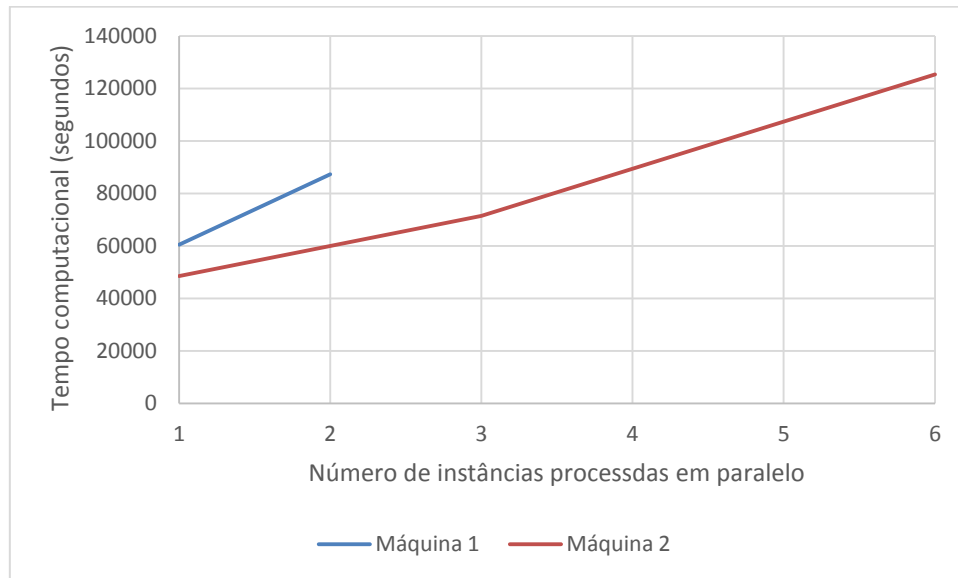


**Figura 30. Média dos tempos computacionais exigidos para cada cenário.**

Uma outra análise que pode ser realizada refere-se à possibilidade de processamento de mais de uma instância da simulação ao mesmo tempo. Na máquina 1, foram testados casos em que 1 instância é processada por vez e casos em que 2 instâncias foram processadas por vez. Na máquina 2 foram testados casos com 1, 3 e 6 instâncias sendo processadas ao mesmo tempo. Os resultados estão na Figura 31.

Assim, para a máquina 1, o tempo computacional de cada experimento ficou 1,45 vezes maior ao se duplicar o número de experimentos. Da mesma forma, para a máquina 2, ao se triplicar o número de instâncias processadas, o tempo computacional para o processamento de cada instância aumenta 1,47 vezes. Para o caso do processamento de 6 instâncias ao mesmo tempo, o processamento ocorre em 2,58 vezes o tempo do processamento de apenas uma instância. Em todos estes três casos, o novo

tempo de processamento acaba sendo menor que a simulação dos experimentos em série, apenas um por vez. Comprova-se assim a viabilidade desta estratégia.



**Figura 31. Tempos computacionais para diferentes quantidades de experimentos processados em paralelo.**

## 7 Conclusões

Neste capítulo, inicialmente é realizada uma análise dos resultados dos experimentos realizados. Posteriormente, explicitam-se novas possibilidades de estudo e de melhorias na metodologia que serão realizadas em trabalhos futuros.

### 7.1 Análise dos resultados

Os objetivos iniciais da pesquisa foram cumpridos. Além de se expandir o conhecimento sobre a logística de abastecimento de insumos para a confecção de fluidos de perfuração, foi possível desenvolver uma ferramenta que pode ser utilizada no planejamento tático da logística de abastecimento destes insumos. Torna-se possível obter uma grande variedade de resultados, como, por exemplo, níveis de estoque esperados, quantidades que deverão ser entregues e qual embarcação deverá realizar a entrega.

A partir da simulação, foi possível determinar o tamanho de frota ideal para que não haja faltas de produtos, que, para as instâncias testadas, é de 16 embarcações. Entretanto, como a quantidade de poços perfurados por dia apresenta flutuações, acredita-se ser uma boa estratégia manter uma frota que não seja constante, recorrendo-se ao mercado *spot* ou recorrendo-se a outras frotas da empresa em situações de maior quantidade de entregas. Além disso, manter uma quantidade reserva de fluido nas embarcações pode reduzir a frota necessária, o que pode ser também uma boa estratégia para redução de custos.

Como contribuições acadêmicas, o trabalho trouxe a compreensão do problema logístico de abastecimento de fluidos de perfuração, algo não muito explorado pela literatura. Além da aplicação à instância apresentada neste trabalho, acredita-se que a aplicação desenvolvida possa ser útil em problemas reais do setor de óleo & gás. Além disso, vislumbra-se uma série de trabalhos futuros, que podem tornar a ferramenta mais completa, eficiente e próxima da realidade.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Pode-se vislumbrar três frentes de trabalho que podem surgir no futuro. A primeira delas refere-se a melhorias na implementação, para torná-la ainda mais rápida e eficiente. A segunda frente que deve surgir refere-se à busca por novas estratégias de resolução para o problema, sobretudo buscando-se obter em um tempo computacional razoável soluções exatas para o problema de roteamento de embarcações e alocação de entregas às rotas, levando-se em conta os estoques nas unidades marítimas. Por fim, a terceira frente refere-se a expansão da utilização da metodologia para outros tipos de produtos.

O planejamento tático exige repetição do mesmo procedimento realizado para o planejamento operacional tantos quantos forem os horizontes de planejamento, exigindo-se um tempo computacional bem mais elevado. Graças a isso, torna-se mais difícil a realização de um número muito grande de replicações. Assim, evidencia-se a necessidade de aumento na eficiência do código.

Para aumentar a eficiência do código, pode-se, por exemplo, investir na utilização de funções e procedimentos que exijam um tempo computacional menor. Além disso, segundo PRABHAKARAN (2016), uma das estratégias para tornar códigos em R mais eficientes consiste na pré-alocação das estruturas, inicializando-as antes de sua utilização, visando manter fixa a sua dimensão ao longo de todo o código. Por isso, propõe-se uma revisão do código, inicializando-se as variáveis em todos os casos que isso não tenha sido feito.

Além disso, uma das estratégias citadas em PRABHAKARAN (2016) para aumentar a eficiência do código é a paralelização. Como durante a simulação diferentes replicações não apresentam dependência entre si, torna-se completamente possível paralelizar o código efetuando-se uma série de replicações paralelamente. Atualmente, isto é realizado artificialmente, com mais de uma instância do R sendo executada ao mesmo tempo. Entretanto, é também possível realizar esta paralelização diretamente no código.



De fato, segundo WICKHAM (2014), R não é uma linguagem de programação cujas implementações sejam rápidas. Pode-se garantir ganhos de velocidade revisando o código e tornando-o eficiente, que é um objetivo primário dos trabalhos futuros. Entretanto, caso mesmo assim não se garanta total eficiência, pode-se investir na utilização de demais linguagens de programação. Neste caso, entretanto, pode-se haver prejuízo no processo de criação de instâncias, já que a linguagem R apresenta como um dos maiores pontos positivos a existência de vários pacotes úteis para manipulação de dados estatísticos.

Em relação à procura por novas estratégias de resolução do problema, uma das soluções que pode ser seguida é a utilização de programação matemática para encontrar soluções exatas, ao invés da utilização de simulação. Atualmente, a metodologia de criação de rotas é apenas gulosa, dando-se preferência ao atendimento do poço cujo início da perfuração é mais antigo. Propõe-se a utilização da programação matemática para encontrar rotas e alocação de demandas cuja solução seja ótima. Como considera-se que os dados das demandas são estocásticos, pode ser necessária a utilização de programação estocástica.

Pode-se implementar um modelo de otimização unindo decisões para o estoque e roteamento de veículos, como os propostos por COELHO & LAPORTE (2013) e COELHO *et al.* (2012). Segundo a literatura, grande parte dos problemas deste tipo são resolvidos por heurísticas ou por *branch-and-cut* (COELHO & LAPORTE, 2013), portanto é provável que a implementação almejada tenha de ter esta característica também. Os modelos respondem a três questões primordiais: quando fazer a visita, quantidade entregue e alocação das entregas às rotas. Quanto aos procedimentos computacionais necessários para a solução do modelo matemático, pretende-se utilizar alguma ferramenta computacional disponível no ambiente acadêmico, como, por exemplo, o software AIMMS ou, preferencialmente, alguma ferramenta de uso livre, como Python por exemplo.

Um dos destaques é que esta abordagem pode trazer contribuições científicas interessantes, já que se pretende incluir no modelo de *inventory-routing* a estrutura de *pick-up & delivery*. Além disso, a própria formulação do problema de entrega de fluidos de perfuração como um problema de *inventory-routing* é algo ainda não explorado na literatura.

Por fim, um último objetivo almejado nos trabalhos futuros é a flexibilização da implementação. Além de bases, vários outros produtos compõem fluidos e sua logística também pode ser analisada em conjunto, inclusive, produtos que não sejam utilizados na composição de fluidos também podem ser considerados. Barcos PSVs são multipropósito, mas sua utilização no Brasil é segregada por frotas específicas para tipos de produto. Uma análise interessante consiste em comparar a operação multipropósito com a operação segregada.

# Referências Bibliográficas

AAS, B.; HALSKAU SR, Ø.; WALLACE, S. W. "The role of supply vessels in offshore logistics". **Maritime Economics & Logistics**, v. 11, n. 3, p. 302–325, 2008.

ALBA, A.; FRAGACHAN, F.; OVALLE, A.; SHOKANOV, T. "Environmentally Safe Waste Disposal : The Integration of Cuttings Collection , Transport, and Reinjection". **International Oil Conference and Exhibition**, SPE 108912, Veracruz, México, Junho 2007.

ANEICHYK, T, 2009, **Simulation model for strategical fleet sizing and operational planning in offshore supply vessels operations**. Dissertação de mestrado, Molde University College, Molde, Noruega, 2009.

ANP. **Dados estatísticos**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>>. Acesso em: 23 de outubro de 2016.

ANP. **Mapa Brasil Rounds**. Disponível em: <[http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/mapas/Janeiro\\_2017/Mapa\\_Brasil\\_Rounds\\_Jan\\_17.pdf](http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/mapas/Janeiro_2017/Mapa_Brasil_Rounds_Jan_17.pdf)>. Acesso em: 9 de fevereiro de 2017a.

ANP. **Dados de E&P**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/gestao-de-contratos-de-e-p/dados-de-e-p>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017b.

BALCI, O. "Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study". In: **Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference**, pp 215-220, Orlando, Estados Unidos, Dezembro. 1994.

CHAGAS, R. D. S, 2015, **O problema de programação de berços portuários para operações de suprimento offshore**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Rio de Janeiro,RJ, Brasil, 2015.

COELHO, L. C.; CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G. "Consistency in multi-vehicle inventory-routing". **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 24, p. 270–287, 2012.

COELHO, L. C.; LAPORTE, G. "The exact solution of several classes of inventory-routing problems". **Computers and Operations Research**, v. 40, n. 2, p. 558–565, 2013.

DOS SANTOS, G. B.; VELOSO, J. "The Challenges for the Treatment of Drilling Fluid Wastes Generated by E & P Industry in Brazil". **SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Social Responsibility, and Environment Conference**, SPE 165613, **Anais**, Lima, Peru, Junho 2013.

FERREIRA FILHO, V. J. M. **Gestão de operações e logística na produção de petróleo**. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2016.

GOMES, H.; ANDERSON, N.; DUARTE, R. "Uma proposta para a detecção do

adequado período de aquecimento em modelos de simulação". **Gestão da produção, operação e sistemas**, v. 6, n. 4, p. 11–26, 2011.

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)**, v. 6701 LNCS, p. 559–573, 2011.

HALVORSEN-WEARE, E. E.; FAGERHOLT, K.; NONÅS, L. M.; ASBJORNSLETT, B. E.; MAGNE, L.; EGIL, B.; NONÅS, L. M.; ASBJORNSLETT, B. E. "Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels". **European Journal of Operational Research**, v. 223, n. 2, p. 508–517, 2012.

HAMACHER, S.; FERREIRA FILHO, V. J. M. **Aplicações de pesquisa operacional na indústria internacional de petróleo e gás**. Rio de Janeiro, Brasil, Elsevier, 2015.

HARRIS, F. W. "How many parts do make at once". **Factory, The Magazine of Management**, v. 10, n. 2, 1913.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8a. ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2006.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena**. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 2010.

LANGEVIN, A.; RIOPEL, D. **Logistics Systems: Design and Optimization**. 1. ed. Montreal, Springer, 2005.

LEITE, R. P., 2012, **Maritime transport of deck cargo to Petrobras fields in Campos Basin: an empirical analysis, identification and quantification of improvement points**. Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

MAISIUK, Y.; GRIBKOVSKAIA, I. "Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times". **Procedia Computer Science**, v. 31, p. 939–948, 2014.

MULLER, M. **Essentials of inventory management**. 2a. ed. New York, AMACOM, 2011.

PETROBRAS. **Plano estratégico de negócios e gestão 2017-2021**. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/apresentacoes/plano-de-negocios-e-gestao>>. Acesso em: 23 out. 2016.

PRABHAKARAN, S. **Strategies to Speedup R Code**. Disponível em: <<https://www.r-bloggers.com/strategies-to-speedup-r-code/>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2017.

SHYSHOU, A.; GRIBKOVSKAIA, I.; BARCELÓ, J. "A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations". **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 230–240, 2010.

SKONNORD, O. P.; EVANS, D. **Offshore rig driller seadrill hopes to see market turn in 2017**. Disponível em: <[http://www.rigzone.com/news/article.asp?a\\_id=141009](http://www.rigzone.com/news/article.asp?a_id=141009)>. Acesso em: 9 de maio de 2017.

2016.

SVENSEN, T.; TAUGBØL, K.; ASA, S. "Drilling Waste Handling in Challenging Offshore Operations". **SPE Arctic and Extreme Environments Conference & Exhibition**, SPE 149575, Moscow, Russia, Outubro 2011.

TERZI, S.; CAVALIERI, S. "Simulation in the supply chain context: A survey". **Computers in Industry**, v. 53, n. 1, p. 3–16, 2004.

THOMAS, J. E. Perfuração. In: **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil, Editora Interciência, 2001.

UGLANE, V. T.; FRIEDBERG, D. Ø.; ANDERSSON, H., 2012, **Routing and Scheduling of Platform Supply Vessels**. Dissertação de mestrado, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, 2012.

URROZ, G. E. Solution of non-linear equations. n. September, p. 18, 2004. Disponível em:

<[http://ocw.usu.edu/Civil\\_and\\_Environmental\\_Engineering/Numerical\\_Methods\\_in\\_Civil\\_Engineering/NonLinearEquationsMatlab.pdf](http://ocw.usu.edu/Civil_and_Environmental_Engineering/Numerical_Methods_in_Civil_Engineering/NonLinearEquationsMatlab.pdf)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2017.

WICKHAM, H. **Advanced R**. 1. ed. Miami, Taylor & Francis, 2014.

WINDECK, V. **A Liner Shipping Network Design**. 1. ed. New York, Springer, 2013.

ZAMORA, M.; BROUSSARD, P. N.; STEPHENS, M. P. "The Top 10 Mud-Related Concerns in Deepwater Drilling Operations". **2000 SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico**, SPE 59019, Villahermosa, México, Fevereiro 2000.

ZIUKOV, S. "A literature review on models of inventory management under uncertainty". **Business Systems & Economics**, v. 5, n. 1, p. 26, 2015.

# Apêndice A

## Tabelas com os níveis de estoques diários de cada sonda obtidos na replicação 1 do cenário com 16 barcos

Dias com estoques de fluido iguais a 0 bbl não foram explicitados nas tabelas.

Poço 1		Poço 2		Poço 3		Poço 4		Poço 5	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
23	3000	24	3000	24	3000	35	2333	42	3000
24	3000	25	3000	25	3000	36	2333	43	3000
25	3000	26	3000	26	3000	37	2333	44	3000
26	3938	27	4250	27	4500	38	4667	45	4900
27	2188	28	2500	28	4500	39	4667	46	4900
28	1688	29	2000	29	3333	40	3500	47	3150
29	2500	30	2500	30	4083	41	3667	48	3500
30	2000	31	2000	31	2917	42	2000	49	3000
31	1500	32	1500	32	2333	43	1500	50	2500
32	1000	33	1000	33	2333	44	2000	51	2000
33	500	34	500	34	1750	45	1500	52	1500
56	571	57	250	35	1167	46	1000	53	1000
57	571	58	250	36	583	47	500	54	500
58	571	59	250	60	571	71	571	78	750
59	1143	60	1143	61	571	72	571	79	750
60	1143	61	1143	62	571	73	571	80	750
61	893	62	1143	63	1250	74	1143	81	1429
62	1464	63	1464	64	1250	75	1143	82	1179
63	1214	64	1179	65	964	76	893	83	929
64	929	65	893	66	1429	77	1500	84	1214
65	857	66	857	67	1179	78	1250	85	964
66	571	67	857	68	893	79	1000	86	714
67	286	68	571	69	571	80	750	87	500
		69	286	70	286	81	500	88	250
						82	250		

Poço 6		Poço 7		Poço 8		Poço 9		Poço 10	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
37	1167	53	3000	63	2333	61	2333	59	3000
38	1167	54	3000	64	2333	62	2333	60	3000

39	1167	55	3000	65	2333	63	2333	61	3000
40	4167	56	4667	66	4667	64	4900	62	5833
41	4167	57	4667	67	4667	65	4900	63	4083
42	4167	58	2917	68	4667	66	3150	64	2333
43	4250	59	3000	69	4250	67	3500	65	3000
44	2500	60	2300	70	2500	68	3000	66	2500
45	1917	61	1600	71	1917	69	2500	67	2000
46	2333	62	1400	72	2333	70	2000	68	1500
47	1750	63	700	73	1750	71	1500	69	1000
48	1167	86	286	74	1167	72	1000	70	500
49	583	87	286	75	583	73	500	92	286
73	857	88	286	96	222	97	750	93	286
74	857	89	1000	97	222	98	750	94	286
75	857	90	1000	98	222	99	750	95	1143
76	1429	91	1000	99	1000	100	1429	96	1143
77	1143	92	1429	100	1000	101	1179	97	1143
78	857	93	1143	101	1000	102	893	98	1464
79	1143	94	857	102	1500	103	1143	99	1179
80	857	95	857	103	1250	104	857	100	893
81	857	96	857	104	1000	105	857	101	857
82	571	97	571	105	1000	106	571	102	857
83	286	98	286	106	750	107	286	103	571
				107	500			104	286
				108	250				

Poço 11		Poço 12		Poço 13		Poço 14		Poço 25	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
57	1750	59	1750	59	1167	60	1750	60	1750
58	1750	60	1750	60	1167	61	1750	61	1750
59	1750	61	1750	61	1167	62	1750	62	1750
60	4750	62	4375	62	4083	63	4500	63	4083
61	4750	63	4375	63	4083	64	4500	64	4083
62	4750	64	4375	64	2333	65	4500	65	4083
63	5000	65	4333	65	3500	66	4250	66	3000
64	3250	66	3167	66	2917	67	2500	67	1250
65	1500	67	2000	67	2333	68	2000	68	667
66	3063	68	3000	68	1750	69	2500	69	2333
67	2625	69	2500	69	1167	70	2000	70	1750
68	2188	70	2000	70	583	71	1500	71	1167
69	1750	71	1500	92	250	72	1000	72	583
70	1313	72	1000	93	250	73	500	93	222
71	875	73	500	94	250	96	500	94	222
72	438	98	857	95	1000	97	500	95	222
96	857	99	857	96	1000	98	500	96	1000

97	857	100	857	97	1000	99	1111	97	1000
98	857	101	1714	98	1528	100	1111	98	1000
99	1429	102	1429	99	1278	101	889	99	1306
100	1143	103	1143	100	1056	102	1306	100	1056
101	857	104	1179	101	1111	103	1083	101	806
102	1143	105	893	102	889	104	833	102	1000
103	857	106	607	103	667	105	778	103	750
104	857	107	286	104	444	106	556	104	500
105	571			105	222	107	333	105	250
106	286					108	222		

Poço 16		Poço 17		Poço 18		Poço 19		Poço 20	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
68	3000	72	1750	74	3000	87	3000	80	3000
69	3000	73	1750	75	3000	88	3000	81	3000
70	3000	74	1750	76	3000	89	3000	82	3000
71	4500	75	4750	77	5250	90	4250	83	4667
72	4500	76	3000	78	4083	91	2500	84	4667
73	4500	77	1250	79	2917	92	1917	85	4667
74	5133	78	2800	80	3500	93	2333	86	4250
75	3967	79	2100	81	3000	94	1750	87	2500
76	2800	80	1400	82	2500	95	1167	88	2000
77	2800	81	700	83	2000	96	583	89	2500
78	2100	105	500	84	1500	120	750	90	2000
79	1400	106	500	85	1000	121	750	91	1500
80	700	107	500	86	500	122	750	92	1000
101	222	108	1250	110	286	123	1500	93	500
102	222	109	1250	111	286	124	1214	116	500
103	222	110	1000	112	286	125	929	117	500
104	1143	111	1500	113	1143	126	1143	118	500
105	1143	112	1250	114	1143	127	857	119	1143
106	1143	113	1000	115	1143	128	857	120	1143
107	1492	114	778	116	1714	129	571	121	857
108	1242	115	528	117	1429	130	286	122	1429
109	992	116	278	118	1143	87	3000	123	1143
110	1000			119	857	88	3000	124	857
111	750			120	607	89	3000	125	857
112	500			121	357	90	4250	126	571
113	250			122	250	91	2500	127	286
						92	1917		



Poço 21		Poço 22		Poço 23		Poço 24		Poço 25	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
79	1167	87	1167	87	1750	89	1750	101	3000
80	1167	88	1167	88	1750	90	1750	102	3000
81	1167	89	1167	89	1750	91	1750	103	3000
82	4000	90	4083	90	4667	92	4000	104	5500
83	4000	91	4083	91	4667	93	4000	105	3750
84	4000	92	4083	92	4667	94	4000	106	2000
85	5500	93	5000	93	5500	95	4250	107	2917
86	3750	94	5000	94	3750	96	2500	108	2333
87	2000	95	3250	95	2000	97	2000	109	1750
88	2917	96	3000	96	3000	98	2500	110	1167
89	2333	97	2417	97	2500	99	2000	111	583
90	1750	98	1833	98	2000	100	1500	134	571
91	1167	99	1750	99	1500	101	1000	135	571
92	583	100	1167	100	1000	102	500	136	571
115	500	101	583	101	500	125	750	137	1250
116	500	123	250	122	0	126	750	138	1250
117	500	124	250	123	286	127	750	139	1000
118	1111	125	250	124	286	128	1500	140	1333
119	1111	126	1143	125	286	129	1250	141	1083
120	861	127	1143	126	1143	130	1000	142	833
121	1500	128	1143	127	1143	131	1250	143	750
122	1250	129	1429	128	1143	132	1000	144	500
123	1000	130	1143	129	1464	133	778	145	250
124	889	131	857	130	1179	134	639	101	3000
125	667	132	1000	131	893	135	389	102	3000
126	444	133	750	132	857	136	139	103	3000
127	222	134	500	133	857			104	5500
		135	250	134	571			105	3750
				135	286			106	2000

Poço 26		Poço 27		Poço 28		Poço 29		Poço 30	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
105	1750	123	2333	124	3000	129	3000	139	3571
106	1750	124	2333	125	3000	130	3000	140	3571
107	1750	125	2333	126	3000	131	3000	141	3571
108	4500	126	4500	127	5250	132	5833	142	4667
109	4500	127	4500	128	3500	133	4083	143	3500
110	4500	128	3333	129	1750	134	2333	144	2333
111	5133	129	4083	130	2917	135	2917	145	2917
112	3967	130	2917	131	2333	136	2333	146	2333
113	2800	131	2417	132	1750	137	1750	147	1750

114	3000	132	2500	133	1167	138	1167	148	1167
115	2500	133	2000	134	583	139	583	149	583
116	2000	134	1500	157	286	162	444	172	750
117	1500	135	1000	158	286	163	444	173	750
118	1000	136	500	159	286	164	444	174	750
119	500	159	571	160	1000	165	1250	175	1500
141	222	160	571	161	1000	166	1250	176	1278
142	222	161	571	162	1000	167	1000	177	1056
143	222	162	1250	163	1429	168	1500	178	1306
144	1000	163	1250	164	1143	169	1278	179	1056
145	1000	164	964	165	893	170	1028	180	806
146	1000	165	1429	166	964	171	750	181	528
147	1750	166	1143	167	679	172	500	182	306
148	1464	167	857	168	393	173	250	183	83
149	1179	168	857						
150	1179	169	571						
151	929	170	286						
152	643								
153	286								

Poço 31		Poço 32		Poço 33		Poço 34		Poço 35	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
136	2333	134	3000	143	2333	157	3000	174	3000
137	2333	135	3000	144	2333	158	3000	175	3000
138	2333	136	3000	145	2333	159	3000	176	3000
139	4667	137	3500	146	4500	160	4667	177	5250
140	4667	138	3500	147	4500	161	4667	178	5250
141	3500	139	3500	148	3333	162	2917	179	3500
142	3667	140	5250	149	3667	163	3000	180	3500
143	2500	141	4083	150	2500	164	2300	181	3000
144	2000	142	2917	151	2000	165	1600	182	2500
145	2500	143	3500	152	2500	166	1400	183	2000
146	2000	144	2800	153	2000	167	700	184	1500
147	1500	145	2100	154	1500	190	750	185	1000
148	1000	146	1400	155	1000	191	750	186	500
149	500	147	700	156	500	192	750		
172	500	170	571	179	571	193	1333		
173	500	171	571	180	571	194	1083		
174	500	172	571	181	571	195	833		
175	1250	173	1250	182	1143	196	1250		
176	1250	174	1250	183	1143	197	1000		
177	1000	175	964	184	893	198	750		
178	1500	176	1429	185	1500	199	500		
179	1250	177	1143	186	1250	200	250		

180	1000	178	857	187	1000				
181	750	179	857	188	750				
182	500	180	571	189	500				
183	250	181	286	190	250				

Poço 36		Poço 37		Poço 38		Poço 39		Poço 40	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
175	3000	163	3000	176	3000	181	3000	177	1750
176	3000	164	3000	177	3000	182	3000	178	1750
177	3000	165	3000	178	3000	183	3000	179	1750
178	5833	166	4333	179	5500	184	5833	180	4500
179	4083	167	3167	180	4333	185	4083	181	4500
180	2333	168	2000	181	3167	186	2333	182	4500
181	2917	169	3000	182	3000	187	3000	183	4667
182	2333	170	2500	183	2500	188	2500	184	3500
183	1750	171	2000	184	2000	189	2000	185	2333
184	1167	172	1500	185	1500	190	1500	186	2800
185	583	173	1000	186	1000	191	1000	187	2100
		174	500	187	500	192	500	188	1400
		196	250					189	700
		197	250						
		198	250						
		199	1143						
		200	1143						

Poço 41		Poço 42		Poço 43		Poço 44		Poço 45	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
183	1750	193	3000	186	2333	195	3000	195	3000
184	1750	194	3000	187	2333	196	3000	196	3000
185	1750	195	3000	188	2333	197	3000	197	3000
186	4667	196	5833	189	5333	198	4250	198	4900
187	4667	197	5833	190	5333	199	2500	199	4900
188	4667	198	4083	191	3583	200	2000	200	4900
189	4250	199	3500	192	3500				
190	2500	200	2917	193	3000				
191	2000			194	2500				
192	2500			195	2000				
193	2000			196	1500				
194	1500			197	1000				
195	1000			198	500				
196	500								

Poço 46		Poço 47		Poço 48		Poço 49		Poço 50	
Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)	Dia	Estoque (bbl)
200	0	199	1750	200	0	197	3000	200	0
		200	1750			198	3000		
						199	3000		
						200	5833		

# Apêndice B

## Tabelas com a programação de viagens para os barcos na replicação 1 do cenário com 16 barcos

Barco 1:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	22	0	0	0
1	23	24	3000	0	3000
0	25	26	0	3000	-3000
2	27	28	3000	0	3000
0	29	34	0	3000	-3000
4	35	53	3000	666.6667	2333.333
0	54	55	666.6667	3000	-2333.33
7	56	58	3000	1333.333	1666.667
1	59	65	1333.333	761.9048	571.4286
1	65	71	761.9048	833.3333	-71.4286
1	71	72	833.3333	3000	-2166.67
6	73	74	3000	2142.857	857.1429
0	75	77	2142.857	3000	-857.143
5	78	79	3000	2250	750
18	80	81	2250	500	1750
0	82	84	500	3000	-2500
21	85	86	3000	1500	1500
22	87	88	1500	333.3333	1166.667
0	89	92	333.3333	3000	-2666.67
15	93	94	3000	2777.778	222.2222
10	95	96	2777.778	1920.635	857.1429
9	97	98	1920.635	1170.635	750
11	99	100	1170.635	599.2063	571.4286
7	101	103	599.2063	3000	-2400.79
16	104	106	3000	2079.365	920.6349
7	107	109	2079.365	3000	-920.635
18	110	111	3000	2714.286	285.7143
0	112	115	2714.286	3000	-285.714
20	116	118	3000	2500	500
9	118	119	2500	3000	-500
20	119	121	3000	2357.143	642.8571
9	121	122	2357.143	3000	-642.857
20	122	124	3000	2142.857	857.1429
9	124	125	2142.857	3000	-857.143

19	126	127	3000	2500	500
18	128	129	2500	3000	-500
28	130	133	3000	1250	1750
28	133	134	1250	1250	-1.8E-12
0	135	139	1250	3000	-1750
32	140	142	3000	1250	1750
18	143	144	1250	3000	-1750
30	145	148	3000	1833.333	1166.667
24	149	156	1833.333	3000	-1166.67
34	157	158	3000	0	3000
0	159	161	0	3000	-3000
27	162	163	3000	2321.429	678.5714
25	164	165	2321.429	3000	-678.571
28	166	167	3000	2642.857	357.1429
29	168	171	2642.857	1892.857	750
29	171	172	1892.857	1920.635	-27.7778
32	173	174	1920.635	1242.063	678.5714
28	175	176	1242.063	3000	-1757.94
35	177	179	3000	750	2250
29	180	181	750	3000	-2250
0	182	183	3000	3000	0
39	184	185	3000	166.6667	2833.333
0	186	195	166.6667	3000	-2833.33
34	196	198	3000	2333.333	666.6667
30	199		2333.333	3000	-666.667

Barco 2:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	23	0	0	0
2	24	25	3000	0	3000
0	26	29	0	3000	-3000
2	30	36	3000	2000	1000
6	37	48	2000	833.3333	1166.667
0	49	52	833.3333	3000	-2166.67
7	53	54	3000	0	3000
0	55	56	0	3000	-3000
11	57	58	3000	1250	1750
13	59	60	1250	83.33333	1166.667
0	61	62	83.33333	3000	-2916.67
8	63	67	3000	666.6667	2333.333
13	68	81	666.6667	666.6667	-1.8E-12
0	82	85	666.6667	3000	-2333.33

20	86	87	3000	1666.667	1333.333
3	87	88	1666.667	3000	-1333.33
7	89	92	3000	2285.714	714.2857
7	92	95	2285.714	1571.429	714.2857
7	95	97	1571.429	1285.714	285.7143
12	98	99	1285.714	428.5714	857.1429
0	100	104	428.5714	3000	-2571.43
26	105	107	3000	1250	1750
10	107	108	1250	3000	-1750
26	108	109	3000	250	2750
0	110	116	250	3000	-2750
17	117	119	3000	3027.778	-27.7778
8	120	121	3027.778	3000	27.77778
18	122	125	3000	2857.143	142.8571
18	125	126	2857.143	3000	-142.857
21	127	128	3000	3000	0
13	128	135	3000	3000	0
0	136	140	3000	3000	0
26	141	142	3000	2777.778	222.2222
20	143	146	2777.778	3000	-222.222
26	147	148	3000	2250	750
20	149	152	2250	3000	-750
26	153	154	3000	3071.429	-71.4286
25	155	156	3071.429	3000	71.42857
28	157	158	3000	2714.286	285.7143
26	159	160	2714.286	3000	-285.714
0	161	162	3000	3000	0
34	163	166	3000	1166.667	1833.333
34	166	169	1166.667	666.6667	500
32	170	171	666.6667	95.2381	571.4286
0	172	174	95.2381	3000	-2904.76
36	175	176	3000	0	3000
0	177	178	0	3000	-3000
38	179	180	3000	500	2500
0	181	185	500	3000	-2500
41	186	187	3000	83.33333	2916.667
0	188	195	83.33333	3000	-2916.67
37	196	197	3000	2750	250
45	198	199	2750	850	1900
32	200		850	3000	-2150

Barco 3:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	23	0	0	0
3	24	25	3000	0	3000
0	26	29	0	3000	-3000
3	30	33	3000	1083.333	1916.667
3	33	34	1083.333	500	583.3333
0	35	37	500	3000	-2500
4	38	55	3000	666.6667	2333.333
1	56	57	666.6667	95.2381	571.4286
0	58	59	95.2381	3000	-2904.76
11	60	61	3000	0	3000
0	62	63	0	3000	-3000
9	64	65	3000	433.3333	2566.667
0	66	67	433.3333	3000	-2566.67
16	68	69	3000	0	3000
0	70	71	0	3000	-3000
17	72	74	3000	1250	1750
2	75	76	1250	3000	-1750
4	77	78	3000	2142.857	857.1429
6	79	83	2142.857	1571.429	571.4286
2	84	85	1571.429	3000	-1428.57
7	86	87	3000	2714.286	285.7143
6	88	89	2714.286	3000	-285.714
19	90	91	3000	0	3000
0	92	95	0	3000	-3000
15	96	97	3000	2222.222	777.7778
10	98	99	2222.222	1615.079	607.1429
9	100	101	1615.079	936.5079	678.5714
11	102	103	936.5079	365.0794	571.4286
0	104	107	365.0794	3000	-2634.92
14	108	109	3000	2888.889	111.1111
10	110	111	2888.889	3000	-111.111
26	111	113	3000	1200	1800
10	113	114	1200	3000	-1800
26	114	116	3000	2300	700
10	116	119	2300	3000	-700
19	120	121	3000	2250	750
10	122	123	2250	3000	-750
28	124	125	3000	0	3000
0	126	128	0	3000	-3000
27	129	130	3000	1083.333	1916.667
16	131	133	1083.333	3000	-1916.67
32	134	135	3000	0	3000



0	136	141	0	3000	-3000
31	142	143	3000	1666.667	1333.333
25	143	145	1666.667	1500	166.6667
31	145	146	1500	500	1000
0	147	157	500	3000	-2500
24	158	159	3000	3138.889	-138.889
28	160	161	3138.889	2424.603	714.2857
26	162	163	2424.603	3000	-575.397
24	164	165	3000	3138.889	-138.889
37	166	167	3138.889	638.8889	2500
26	168	169	638.8889	3000	-2361.11
24	170	171	3000	3138.889	-138.889
30	172	175	3138.889	2388.889	750
30	175	176	2388.889	1638.889	750
0	177	180	1638.889	3000	-1361.11
30	181	182	3000	3055.556	-55.5556
40	183	184	3055.556	1722.222	1333.333
32	185	186	1722.222	3000	-1277.78
39	187	189	3000	1833.333	1166.667
30	190	194	1833.333	3000	-1166.67
44	195	196	3000	0	3000
0	197	198	0	3000	-3000
37	199		3000	2107.143	892.8571

Barco 4:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	25	0	0	0
1	26	27	3000	312.5	2687.5
0	28	39	312.5	3000	-2687.5
6	40	41	3000	0	3000
0	42	44	0	3000	-3000
5	45	59	3000	1100	1900
2	60	61	1100	207.1429	892.8571
0	62	64	207.1429	3000	-2792.86
10	65	68	3000	1833.333	1166.667
14	69	70	1833.333	833.3333	1000
4	71	72	833.3333	261.9048	571.4286
0	73	74	261.9048	3000	-2738.1
17	75	76	3000	0	3000
0	77	78	0	3000	-3000
21	79	84	3000	1833.333	1166.667
6	85	86	1833.333	3000	-1166.67
5	87	88	3000	2964.286	35.71429

20	89	90	2964.286	1964.286	1000
3	90	91	1964.286	3000	-1035.71
10	92	93	3000	2714.286	285.7143
6	94	95	2714.286	3000	-285.714
11	96	97	3000	2142.857	857.1429
0	98	100	2142.857	3000	-857.143
16	101	103	3000	2777.778	222.2222
12	104	107	2777.778	2492.063	285.7143
12	107	110	2492.063	2527.778	-35.7143
12	110	115	2527.778	3000	-472.222
18	116	119	3000	2142.857	857.1429
0	120	122	2142.857	3000	-857.143
19	123	124	3000	2250	750
24	125	128	2250	1500	750
24	128	131	1500	750	750
24	131	132	750	250	500
0	133	134	250	3000	-2750
29	135	136	3000	1833.333	1166.667
32	137	139	1833.333	1333.333	500
18	140	141	1333.333	3000	-1666.67
30	142	143	3000	738.0952	2261.905
19	144	153	738.0952	3000	-2261.9
0	154	158	3000	3000	0
27	159	160	3000	2428.571	571.4286
24	161	162	2428.571	2567.46	-138.889
28	163	164	2567.46	1853.175	714.2857
26	165	166	1853.175	3000	-1146.83
24	167	168	3000	3138.889	-138.889
37	169	170	3138.889	1638.889	1500
26	171	172	1638.889	3000	-1361.11
24	173	174	3000	3138.889	-138.889
31	175	176	3138.889	2388.889	750
27	177	178	2388.889	3000	-611.111
0	179	180	3000	3000	0
36	181	182	3000	1833.333	1166.667
27	183	184	1833.333	3000	-1166.67
33	185	189	3000	2142.857	857.1429
41	189	190	2142.857	809.5238	1333.333
32	191	192	809.5238	3000	-2190.48
42	193	194	3000	0	3000
0	195	196	0	3000	-3000
49	197	198	3000	0	3000
0	199		0	3000	-3000

Barco 5:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	26	0	0	0
3	27	28	3000	1500	1500
1	29	30	1500	187.5	1312.5
0	31	40	187.5	3000	-2812.5
4	41	44	3000	1666.667	1333.333
4	44	56	1666.667	666.6667	1000
2	57	58	666.6667	416.6667	250
0	59	60	416.6667	3000	-2583.33
9	61	62	3000	666.6667	2333.333
11	63	64	666.6667	416.6667	250
0	65	68	416.6667	3000	-2583.33
15	69	71	3000	750	2250
2	72	73	750	3000	-2250
4	74	75	3000	2428.571	571.4286
6	76	77	2428.571	1857.143	571.4286
2	78	81	1857.143	3000	-1142.86
21	82	83	3000	166.6667	2833.333
0	84	86	166.6667	3000	-2833.33
19	87	88	3000	0	3000
0	89	92	0	3000	-3000
19	93	95	3000	2000	1000
8	96	97	2000	1777.778	222.2222
13	98	101	1777.778	1027.778	750
13	101	104	1027.778	750	277.7778
17	105	106	750	250	500
0	107	122	250	3000	-2750
22	123	124	3000	2750	250
10	125	126	2750	3000	-250
28	127	128	3000	750	2250
17	129	133	750	3000	-2250
24	134	135	3000	2888.889	111.1111
21	136	137	2888.889	3000	-111.111
13	137	138	3000	3000	0
31	139	140	3000	666.6667	2333.333
25	140	141	666.6667	111.1111	555.5556
0	142	143	111.1111	3000	-2888.89
26	144	145	3000	2222.222	777.7778
33	146	147	2222.222	55.55556	2166.667
0	148	159	55.55556	3000	-2944.44
34	160	161	3000	1333.333	1666.667
29	162	165	1333.333	888.8889	444.4444
29	165	166	888.8889	83.33333	805.5556

0	167	171	83.33333	3000	-2916.67
31	172	173	3000	2500	500
26	174	175	2500	3000	-500
32	176	177	3000	2250	750
28	178	179	2250	3000	-750
40	180	181	3000	250	2750
0	182	195	250	3000	-2750
42	196	197	3000	166.6667	2833.333
0	198	199	166.6667	3000	-2833.33
49	200		3000	166.6667	2833.333

Barco 6:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	41	0	0	0
5	42	43	3000	0	3000
0	44	47	0	3000	-3000
5	48	59	3000	900	2100
3	60	61	900	328.5714	571.4286
0	62	64	328.5714	3000	-2671.43
12	65	68	3000	1875	1125
12	68	69	1875	375	1500
0	70	73	375	3000	-2625
18	74	75	3000	0	3000
0	76	77	0	3000	-3000
17	78	80	3000	750	2250
5	81	82	750	71.42857	678.5714
0	83	86	71.42857	3000	-2928.57
23	87	88	3000	1250	1750
4	89	91	1250	3000	-1750
24	92	95	3000	750	2250
5	96	98	750	3000	-2250
8	99	102	3000	2222.222	777.7778
8	102	105	2222.222	1472.222	750
8	105	106	1472.222	1222.222	250
0	107	122	1222.222	3000	-1777.78
23	123	124	3000	2714.286	285.7143
16	125	128	2714.286	3000	-285.714
22	129	132	3000	2428.571	571.4286
22	132	134	2428.571	2035.714	392.8571
19	135	136	2035.714	3000	-964.286
25	137	139	3000	2321.429	678.5714
20	140	141	2321.429	3000	-678.571
0	142	162	3000	3000	0

37	163	164	3000	0	3000
0	165	175	0	3000	-3000
38	176	177	3000	0	3000
0	178	180	0	3000	-3000
39	181	182	3000	0	3000
0	183	197	0	3000	-3000
44	198	199	3000	0	3000
0	200		0	3000	-3000

Barco 7:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	42	0	0	0
6	43	46	3000	1166.667	1833.333
6	46	47	1166.667	166.6667	1000
0	48	58	166.6667	3000	-2833.33
7	59	61	3000	1166.667	1833.333
1	62	63	1166.667	309.5238	857.1429
0	64	65	309.5238	3000	-2690.48
3	66	67	3000	2250	750
9	67	68	2250	150	2100
0	69	70	150	3000	-2850
16	71	74	3000	1500	1500
3	75	76	1500	3000	-1500
18	77	83	3000	750	2250
5	84	85	750	178.5714	571.4286
0	86	87	178.5714	3000	-2821.43
21	88	92	3000	1500	1500
13	92	95	1500	1250	250
13	95	101	1250	500	750
15	102	103	500	55.55556	444.4444
0	104	107	55.55556	3000	-2944.44
17	108	109	3000	2250	750
13	110	115	2250	3000	-750
21	115	116	3000	2500	500
13	116	118	2500	3000	-500
21	118	119	3000	2388.889	611.1111
13	119	121	2388.889	3000	-611.111
21	121	122	3000	2111.111	888.8889
13	122	124	2111.111	3000	-888.889
21	124	125	3000	2888.889	111.1111
13	125	126	2888.889	3000	-111.111
0	127	128	3000	3000	0
29	129	130	3000	0	3000

0	131	142	0	3000	-3000
32	143	146	3000	1250	1750
22	147	148	1250	3000	-1750
33	149	152	3000	1500	1500
33	152	153	1500	500	1000
0	154	164	500	3000	-2500
27	165	166	3000	2250	750
25	167	168	2250	3000	-750
28	169	172	3000	3107.143	-107.143
28	172	173	3107.143	3000	107.1429
35	174	175	3000	0	3000
0	176	177	0	3000	-3000
30	178	179	3000	2500	500
35	180	182	2500	750	1750
29	183	185	750	3000	-2250
43	186	188	3000	666.6667	2333.333
29	189	192	666.6667	3000	-2333.33
34	193	194	3000	2416.667	583.3333
29	195	196	2416.667	3000	-583.333
0	197	198	3000	3000	0
42	199		3000	1833.333	1166.667

Barco 8:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	58	0	0	0
10	59	60	3000	0	3000
0	61	62	0	3000	-3000
14	63	64	3000	250	2750
0	65	88	250	3000	-2750
24	89	92	3000	1250	1750
5	93	94	1250	3000	-1750
24	95	98	3000	1000	2000
24	98	99	1000	1E-11	1000
0	100	122	1E-11	3000	-3000
27	123	124	3000	666.6667	2333.333
12	125	128	666.6667	3000	-2333.33
23	129	132	3000	2428.571	571.4286
23	132	134	2428.571	2178.571	250
17	135	136	2178.571	3000	-821.429
20	137	138	3000	3571.429	-571.429
30	139	140	3571.429	0	3571.429
0	141	142	0	3000	-3000
33	143	149	3000	666.6667	2333.333

26	150	151	666.6667	416.6667	250
0	152	176	416.6667	3000	-2583.33
40	177	178	3000	1250	1750
33	179	180	1250	678.5714	571.4286
28	181	183	678.5714	3000	-2321.43
30	184	185	3000	2861.111	138.8889
40	186	187	2861.111	1694.444	1166.667
32	188	189	1694.444	3000	-1305.56
34	190	191	3000	2250	750
43	192	195	2250	583.3333	1666.667
0	196	198	583.3333	3000	-2416.67
47	199		3000	1250	1750

Barco 9:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	58	0	0	0
12	59	61	3000	1250	1750
7	62	73	1250	750	500
1	74	77	750	3000	-2250
0	78	89	3000	3000	0
22	90	91	3000	83.33333	2916.667
0	92	95	83.33333	3000	-2916.67
22	96	99	3000	1500	1500
22	99	100	1500	1000	500
12	101	102	1000	142.8571	857.1429
0	103	125	142.8571	3000	-2857.14
22	126	128	3000	2107.143	892.8571
8	129	131	2107.143	3000	-892.857
29	132	133	3000	166.6667	2833.333
0	134	177	166.6667	3000	-2833.33
31	178	179	3000	2250	750
27	180	181	2250	3000	-750
33	182	183	3000	2428.571	571.4286
41	183	185	2428.571	678.5714	1750
27	186	191	678.5714	3000	-2321.43
41	192	194	3000	2000	1000
33	194	195	2000	3000	-1000
45	195	196	3000	0	3000
0	197		0	3000	-3000

Barco 10:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	59	0	0	0
14	60	62	3000	1250	1750
3	63	69	1250	571.4286	678.5714
3	69	72	571.4286	607.1429	-35.7143
3	72	73	607.1429	3000	-2392.86
16	74	77	3000	1200	1800
16	77	78	1200	500	700
0	79	89	500	3000	-2500
23	90	91	3000	83.33333	2916.667
0	92	95	83.33333	3000	-2916.67
23	96	99	3000	1500	1500
6	100	101	1500	3000	-1500
14	102	104	3000	2333.333	666.6667
5	105	106	2333.333	3000	-666.667
25	107	108	3000	1500	1500
9	109	110	1500	3000	-1500
17	111	112	3000	2250	750
18	113	114	2250	1392.857	857.1429
0	115	125	1392.857	3000	-1607.14
23	126	128	3000	2142.857	857.1429
14	129	133	2142.857	3000	-857.143
25	134	136	3000	2428.571	571.4286
31	136	137	2428.571	95.2381	2333.333
0	138	177	95.2381	3000	-2904.76
36	178	179	3000	166.6667	2833.333
0	180	181	166.6667	3000	-2833.33
38	182	183	3000	1500	1500
36	184	186	1500	1500	-1.8E-12
31	187	188	1500	3000	-1500
43	189	190	3000	0	3000
0	191		0	3000	-3000

Barco 11:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	59	0	0	0
15	60	62	3000	1250	1750
2	63	66	1250	678.5714	571.4286
2	66	67	678.5714	428.5714	250
0	68	92	428.5714	3000	-2571.43
22	93	94	3000	2083.333	916.6667



4	95	98	2083.333	3000	-916.667
15	99	100	3000	2444.444	555.5556
10	101	102	2444.444	2194.444	250
9	103	104	2194.444	1658.73	535.7143
14	105	106	1658.73	1492.063	166.6667
16	107	110	1492.063	920.6349	571.4286
16	110	111	920.6349	662.6984	257.9365
0	112	125	662.6984	3000	-2337.3
27	126	132	3000	833.3333	2166.667
27	132	133	833.3333	250	583.3333
0	134		250	3000	-2750

Barco 12:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	61	0	0	0
10	62	63	3000	166.6667	2833.333
0	64	65	166.6667	3000	-2833.33
8	66	77	3000	666.6667	2333.333
3	78	80	666.6667	3000	-2333.33
20	80	81	3000	0	3000
3	81	83	0	3000	-3000
20	83	84	3000	1333.333	1666.667
3	84	85	1333.333	3000	-1666.67
0	86	92	3000	3000	0
23	93	95	3000	2166.667	833.3333
14	96	99	2166.667	1666.667	500
14	99	100	1666.667	1055.556	611.1111
4	101	103	1055.556	3000	-1944.44
25	104	105	3000	500	2500
0	106		500	3000	-2500

Barco 13:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	61	0	0	0
12	62	63	3000	375	2625
0	64	65	375	3000	-2625
11	66	71	3000	1000	2000
8	72	73	1000	1.18E-11	1000
0	74	100	1.18E-	3000	-3000

			11		
25	101	102	3000	0	3000
0	103		0	3000	-3000

Barco 14:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	61	0	0	0
13	62	63	3000	83.33333	2916.667
0	64	65	83.33333	3000	-2916.67
14	66	68	3000	1500	1500
8	69	70	1500	166.6667	1333.333
0	71		166.6667	3000	-2833.33

Barco 15:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	62	0	0	0
15	63	66	3000	666.6667	2333.333
15	66	67	666.6667	0	666.6667
0	68		0	3000	-3000

Barco 16:

Local	Dia de chegada	Dia de saída	Nível de estoque inicial	Nível de estoque final	Quantidade entregue
0	0	64	0	0	0
13	65	66	3000	83.33333	2916.667
0	67		83.33333	3000	-2916.67