

UMA ANÁLISE USANDO TEORIA DE FILAS DO PROBLEMA DE
CARREGAMENTO DE PEDIDOS NO PORTO PARA ABASTECIMENTO DE
UNIDADES MARÍTIMAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Miranda Albino Martins Muaualo

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Virgílio José Martins Ferreira
Filho

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

UMA ANÁLISE USANDO TEORIA DE FILAS DO PROBLEMA DE
CARREGAMENTO DE PEDIDOS NO PORTO PARA ABASTECIMENTO DE
UNIDADES MARÍTIMAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Miranda Albino Martins Muualo

TESE 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 DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

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

Prof^a Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Annibal Parracho Sant'Anna, PhD

Prof. Ralph dos Santos Silva, D.Sc.

Prof. Paulo Cesar Ribas, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2017

Muaualo, Miranda Albino Martins

Uma análise usando teoria de filas do problema de carregamento de pedidos no porto para abastecimento de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo/Miranda Albino Martins Muaualo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XII, 64 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 56 – 64.

1. Sistema de abastecimento. 2. Cadeia de Markov embutida com infinitos estados. 3. Agregação temporal. 4. Ciclos de renovação e recompensa. 5. Tempos de permanência. 6. Processos semi-markovianos. I. Arruda, Edilson Fernandes de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

*Dedico esta tese à minha esposa,
Ana Bela Fernando Bernardo
Dias, que além de ter extenso
amor e ser uma mãe presente,
proporcionou-me momentos
serenos dando-me apoio moral,
de modo que eu acreditasse que
com oração e perseverança seria
possível progredir até chegar a
esta fase, e dedico também aos
meus filhos, Eunice, Loureiro e
Joice, pelas orações
perseverantes.*

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento ao Pai Divino, pela vida e por tudo que tem me proporcionado. De seguida, agradeço ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH/Prh21-ANP) pelo apoio financeiro, porque sem o mesmo não seria possível chegar a esta fase.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PEP) da COPPE/UFRJ e ao Colegiado, pela permissão para a minha formação no programa desde ao nível de Mestrado, pela recepção calorosa e celeridade de todo processo burocrático, e aos Professores da área de Pesquisa Operacional pelo ensinamento, endereço os meus agradecimentos.

Em especial, agradeço imensamente aos Professores Edilson Fernandes de Arruda e Virgílio José Martins Ferreira Filho pelo apoio académico, disponibilidade em todos os momentos, paciência, ensinamentos e pelo exemplo de professores afáveis e sábios acompanhar-me-á como uma referência pelo resto da minha vida.

Ao Professor Virgílio, por tudo que é difícil descrever aqui, desde a sua atenção, apoio financeiro, inclusão no projeto PROBARCO para pesquisa e pelas suas aulas de seminário que ajudaram muito para o melhoramento deste trabalho, agradeço imensamente.

Endereço também a minha especial gratidão à minha esposa, Ana Bela Fernando Bernardo Dias, e aos meus filhos, Eunice, Loureiro (Miranda) e Joice, que desde a concepção da ideia da minha formação ao nível de graduação até a fase final de doutorado, acreditaram em mim, orando com perseverança, dando-me força e todo apoio moral, de modo que fosse possível chegar a essa fase.

Aos meus pais Albino Martins Muualo e Rosalina Amisse, aos meus irmãos Florência, Feliciano, Maurício, Virgílio e Deonilde e aos meus familiares, endereço a minha gratidão por toda educação, orações e apoio moral.

À equipe de trabalho do PEP e SAGE/CT2 em especial aos seguranças, faxineiros, Lusimar Ferreira, Maria Cristina, Yara Martins e à equipe da secretaria do Programa de Engenharia de Produção, e também em especial à Roberta, Claudete, Pedro e Andreia (ex-secretária académica da área de Pesquisa Operacional), pela prontidão, simpatia e carinhoso atendimento.

Agradeço à Soyla Argolo por todo acompanhamento no processo burocrático e em todo momento, pela amizade, carinho e atenção e pela presença constante sempre que houvesse necessidade da sua intervenção no processo burocrático (administrativo financeiro).

Agradeço também ao Sr. José Maria da Silva (Sr. Zé), por todo tratamento carinhoso e pelos cafés. Ao Vicente, Roberta, Sandrine e Rocha pelas conversas no café da manhã e nos períodos do intervalo.

Agradeço profundamente ao Lucas Lavo A. J. Miguel, Cachimo, Danielle Monteiro, Daniel Mazza, Gabriela Chaves, Gustavo, Juliana, Lucy, Prof^o Ralph, Rafael Longhi, Rennan e ao Tales Cardoso, que tecnicamente me foram suavizando a longa viagem até ao trabalho que a seguir apresento.

À Sayuri Valente Arimori pela prontidão e apoio durante todo processo de aquisição e preparação dos dados e, correção do texto inicial, e em especial à equipe do Lorde do Projeto PROBARCO, Rennan, Gustavo, Rafael, Tales, Sayuri, Juliana, Professora Laura, Professor Edilson, Bruno, coordenada pelo Professor Virgílio, pela colaboração, de modo que este curso fosse realidade, muito obrigado. Em especial agradeço à Professora Laura Bahiense, que além das suas observações sobre o trabalho, deu-me força e todo apoio moral.

Aos meus colegas e amigos Ana Luisa, Camila, Clara Duque, Daniel Mazza, Daniel Fuller, Gustavo Bittencourt, Igor Girão, Jéssica Mondego, Juliana, Luis Filipe, Marco Krebs, Marcos Frank Gonçalves, Musbah, Rafael Longhi, Raphael Moraes, Rennan, Ricardo, Ronny, Sayuri, Simone e Victor, endereço profundamente os meus agradecimentos pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos Marcos Frank Gonçalves, Simone, Musbah, Ana Luisa, Raphael Moraes e Marco Krebs pela força, apoio financeiro e toda atenção, endereço a minha gratidão e tudo isso ficará indelével pelo resto da minha vida.

Aos meus amigos, colegas e compatriotas Cachimo e Germildo pelo companheirismo e apoio moral, e ao Daniel Mazza, Filipe e Carlos de Sousa, pela força, ajuda e apoio moral sempre que precisei.

À Direção do Departamento de Matemática e Informática e da Secção de estatística da Universidade Eduardo Mondlane em Moçambique pela permissão para a continuação dos meus estudos, agradeço. Especial agradecimento endereço aos Professores Lino Marques, Manuel Álves e Carvalho Madivate, pelas ideias para a continuação dos meus estudos.

E a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a concretização desta tese e minha formação, endereço a minha gratidão.

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

UMA ANÁLISE USANDO TEORIA DE FILAS DO PROBLEMA DE
CARREGAMENTO DE PEDIDOS NO PORTO PARA ABASTECIMENTO DE
UNIDADES MARÍTIMAS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Miranda Albino Martins Muualo

Dezembro/2017

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Esta tese trata de um sistema de abastecimento composto por uma instalação marítima e uma frota de embarcações que trabalham em conjunto na entrega de pedidos, para o suprimento das unidades offshore. Formulou-se o problema por um modelo GI/M/S que considera o ambiente do porto, isto é, os berços são os servidores, e um modelo M/M/S que considera o ambiente marítimo, isto é, os barcos são os servidores. Para abordar o modelo GI/M/S, propôs-se uma abordagem de cadeia de Markov embutida, em que os estados foram divididos em dois subconjuntos, um representando o sistema totalmente ocupado e outro descrevendo as situações em que o sistema está parcialmente ocioso. Essa representação permitiu encontrar uma solução analítica para o sistema totalmente ocupado, que pode ser combinado com uma análise de absorção simples nos estados restantes para derivar a solução exata para as equações de probabilidade no estado estacionário. Isso contrasta com a abordagem clássica de truncar o espaço de estados para encontrar probabilidades aproximadas de estado estacionário. A abordagem M/M/S na segunda instalação permitiu abordar o problema de dimensionamento da frota e encontrar soluções baseadas nas taxas de ocupação das embarcações e no tempo de espera para pedidos iminentes.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

AN ANALYSIS USING QUEUEING THEORY OF THE PROBLEM OF
LOADING REQUESTS IN THE PORT TO SUPPLY MARITIME
EXPLORATION AND PRODUCTION UNITS OF OIL

Miranda Albino Martins Muaualo

December/2017

Advisors: Edilson Fernandes de Arruda
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

This thesis deals with a supply system comprised of a maritime installation and a fleet of vessels that work together to deliver supply requests to offshore installations. The problem was formulated by a GI/M/S model that considers the port environment, that is, the berths are the servers, and an M/M/S model that considers the maritime environment, that is, vessels are the servers. To address the GI/M/S model, an embedded Markov chain approach was proposed whereby the states space was divided into two subsets, one representing the fully busy system and the other accounting for the situations when the system is partially idle. That representation enabled to find an analytical solution for the fully busy system, which can be combined with simple absorption analysis in the remaining states to derive the exact solution to the steady state probability equations. This contrasts with the classical approach of truncating the state space to find the approximate steady state probabilities. The M/M/S approach at the second installation enabled to address the fleet sizing problem and find solutions based on the occupancy rates of the vessels and the waiting time for impending requests.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	5
1.2 Premissas e suposições	6
1.3 Abordagem	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivos principais	7
1.4.2 Objetivos secundários	7
1.5 Contribuições	8
1.6 Organização do trabalho	9
2 Revisão bibliográfica	10
2.1 Preliminares	10
2.2 Logística offshore	10
2.2.1 Setores da logística offshore	11
2.2.2 Base de apoio	11
2.2.3 Carga transportada	11
2.2.4 Unidades de produção	12
2.2.5 Embarcações	13
2.3 Problema de dimensionamento de frota	14
2.4 Teoria de filas	16
3 Definição do problema	20
3.1 Preliminares	20
3.2 Caracterização do problema	20
3.3 O conceito de “convés virtual”	22
3.4 O sistema de carregamento no porto como um sistema de filas em série	22

4	Modelos de teoria de filas para o problema de carregamento no porto	24
4.1	Preliminares	24
4.2	Visão geral do sistema em dois estágios	24
4.3	O serviço dos berços como um modelo GI/M/B com uma cadeia de Markov embutida	25
4.3.1	Método convencional	29
4.3.2	Método proposto	30
4.3.2.1	Agregação temporal	31
4.3.2.2	Sub-cadeia de Markov do sistema parcialmente ocioso	32
4.3.2.3	Sub-cadeia de Markov do sistema ocupado	34
4.3.2.4	Probabilidades de estado estável do sistema totalmente ocupado	35
4.3.2.5	Produtividade dos servidores com tempos agregados	35
4.3.2.6	Probabilidades de estado estável do sistema ocupado e parcialmente ocioso	36
4.3.2.7	Probabilidades de estado estável do sistema original .	37
4.4	A montagem do convés como um sistema M/M/S	38
5	Exemplo de aplicação	41
5.1	Preliminares	41
5.2	Problema exemplo	41
5.3	Dados, variáveis e parâmetros	42
5.4	Resultados e análises de experimentos do porto	44
5.5	Resultados e análises de experimentos do convés virtual	50
6	Conclusões	54
6.1	Trabalhos futuros	55
6.2	Trabalho resultante da tese	55
	Referências Bibliográficas	56

Lista de Figuras

1.1	Região do pré-sal segundo ANP. Fonte: (ANP, 2017)	2
1.2	Porto de Imbetiba-Macaé/RJ. Fonte: (NET, 2017a)	3
1.3	Embarcação PSV para operações de suprimento. Fonte: (NET, 2017b)	3
1.4	Rede logística das operações de suprimento offshore.	4
1.5	Sistema de abastecimento com duas instalações de atendimento.	5
4.1	Probabilidades de transição do sistema parcialmente ocioso.	27
4.2	Probabilidades de transição do sistema ocupado.	27
4.3	Probabilidades de transição do sistema ocupado para parcialmente ocioso.	28
4.4	Probabilidades de transição do sistema parcialmente ocioso com estado absorvente.	32
5.1	Distribuição estacionária de pedidos no porto.	46
5.2	Utilização de embarcações.	50
5.3	Tempo médio de espera na fila para cada pedido individual.	51

Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros dos modelos	43
5.2	Estimadores e variáveis	43
5.3	Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional	45
5.4	Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional	46
5.5	Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional	46
5.6	Medidas de desempenho obtidas variando a taxa de chegada	48
5.7	Medidas de desempenho obtidas com o aumento do tempo de serviço	49
5.8	Probabilidade do sistema estar ocupado	49
5.9	Pedidos e tempo médio de espera na fila por frota	51
5.10	Tempo de espera na fila para cada pedido individual	52

Capítulo 1

Introdução

As empresas produtoras de petróleo tentam buscar o óleo onde quer que ele esteja, condicionado à viabilidade econômica de sua exploração e produção. No Brasil, foram descobertas ao longo do tempo grandes reservas de petróleo no mar, em especial na Bacia de Campos e mais recentemente nos campos do pré-sal. 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 (Líquido de Gás Natural) 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). 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).

Esta expansão das atividades de exploração e produção (E&P) para unidades mais distantes da costa, como na região do pré-Sal, têm imposto grandes desafios relacionados não apenas a tecnologias voltadas para engenharia de petróleo, mas também ligados à área de planejamento e operação de recursos e infraestrutura logísticos, fundamentais para a continuidade operacional em E&P. Na Figura 1.1, é apresentado um mapa oficial da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) 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 (FRIEDBERG e UGLANE, 2013), resultando em maiores tempos de viagem.

Nesse contexto, a logística de apoio offshore, ou apenas logística offshore—cujo

papel é transportar cargas e pessoas entre instalações em terra, tais como portos e aeroportos, e unidades marítimas, a exemplo, sondas, plataformas e embarcações especiais – surge como uma área com margem relevante para o desenvolvimento de soluções baseadas, por exemplo, em modelos para planejamento e operação de recursos e infraestrutura de forma mais eficiente.

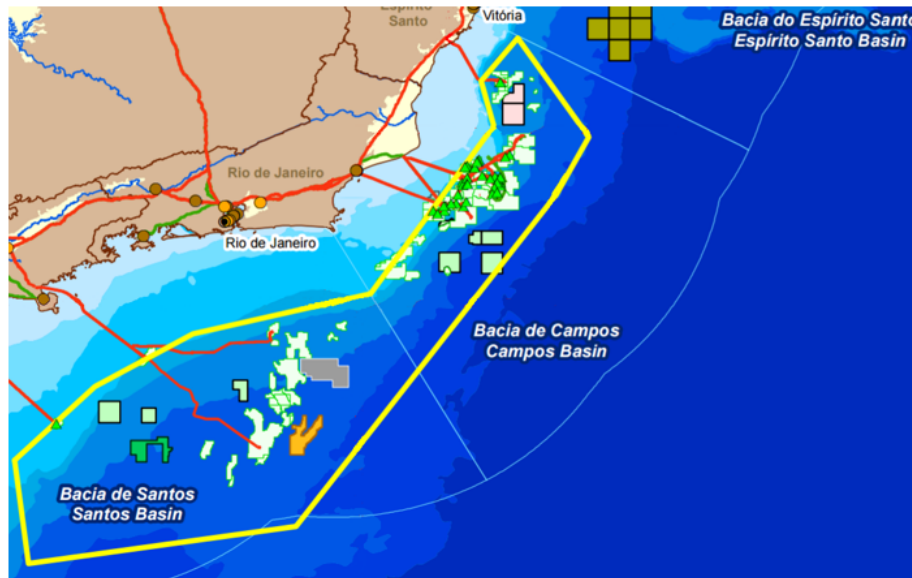


Figura 1.1: Região do pré-sal segundo ANP. Fonte: (ANP, 2017)

Sobre os recursos requeridos, especificamente, instalações portuárias e embarcações supridoras, o dimensionamento e a utilização adequados destes são fundamentais para manutenção de uma operação eficiente e com custo aceitável, dado que a quantidade de carga movimentada é vultosa, tanto no sentido de entrega às unidades, como na remoção destas para tratamento em terra e reuso offshore.

As unidades dispersas em alto mar possuem demandas por comida, ferramentas, tubos, entre outros produtos. Essas mercadorias contratadas com fornecedores são concentradas em portos como o de Imbetiba (Figura 1.2) para o carregamento em embarcações do tipo Platform Supply Vessel (PSV) como a mostrada na Figura 1.3. Essas embarcações transportam a carga necessária para as atividades de unidades de produção e sondas de perfuração. A Figura 1.4 apresenta uma esquematização dessa rede logística.

Um dos pontos centrais desse grupo de atividades logísticas é o porto. Tanto os produtos que precisam ser enviados para as unidades marítimas, quanto as cargas que são trazidas de volta pelas embarcações são carregadas e descarregadas no porto. Esse grande armazém precisa de um bem que é escasso e portanto deve ser muito bem administrado: o tempo.



Figura 1.2: Porto de Imbetiba-Macaé/RJ. Fonte: (NET, 2017a)



Figura 1.3: Embarcação PSV para operações de suprimento. Fonte: (NET, 2017b)

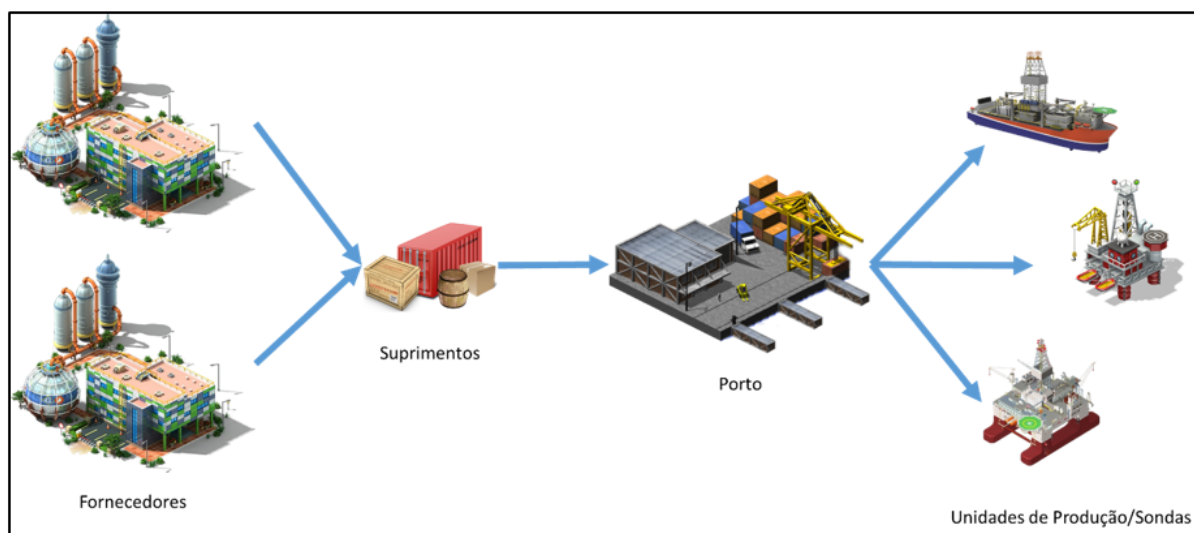


Figura 1.4: Rede logística das operações de suprimento offshore.

A garantia da entrega dos produtos no prazo esperado pelas unidades de produção, e por consequência a continuidade das atividades dentro do programado, é muito influenciada pela forma como o porto será administrado. Além disso, um planejamento eficiente e produtivo das atividades portuárias permite que o mesmo terminal seja capaz de atender um maior número de unidades marítimas, o que reduz consideravelmente os custos por não precisar construir ou contratar novos terminais.

Dentro do porto existe um número limitado de berços que podem ser utilizados para carregamento das embarcações, mas nem todos são compatíveis com qualquer tipo de carga. Além disso, concorrem pela infraestrutura portuária outras frotas com outros fins, tais como embarcações de prontidão contra eventos emergenciais e embarcações para serviços de ancoragem, manutenções programadas, intervalos que devem servir para vistorias de órgãos de fiscalização entre outras atividades.

Todo esse contexto cria uma cadeia logística complexa, na qual o planejamento da demanda, o dimensionamento da frota e a programação das viagens das embarcações supridoras e o gerenciamento das operações portuárias tornam-se tarefas vitais para a manutenção do nível de serviço adequado aos clientes finais, unidades marítimas, visto que a falta de um item nestas gera custos elevados.

Do ponto de vista do ambiente científico a solução destes problemas recai em generalizações desafiadoras de problemas bem conhecidos de pesquisa operacional, tais como: problemas de redes de filas não markovianas, problemas de localização hierárquicos, de múltiplas camadas, com objetivo e restrições não lineares; problemas de roteamento de veículos, com múltiplos depósitos, janela de tempo e sincronização; problemas de projeto de redes com restrições não lineares; problemas de planejamento e sequenciamento da produção. Todos estes problemas estão

nas preocupações mais recentes de pesquisadores de ponta no campo da Pesquisa Operacional.

1.1 Motivação

A motivação desta tese é referente ao sistema descrito na figura 1.5 que representa um sistema de abastecimento logístico para instalações offshore. Os pedidos de fornecimento das unidades offshore chegam no porto em intervalos de tempo regulares e são atendidos por um berço do porto ($Berço_1, Berço_2, \dots, Berço_m$). Depois de ser servido num berço do porto, um pedido é encaminhado para uma unidade de carregamento ou descarregamento (convés virtual), onde espera o serviço de uma embarcação ($Barco_1, Barco_2, \dots, Barco_n$), que então distribui o pedido para um conjunto de unidades offshore (P1, P2, ..., Pz), representado no lado mais à direita da Figura 1.5.

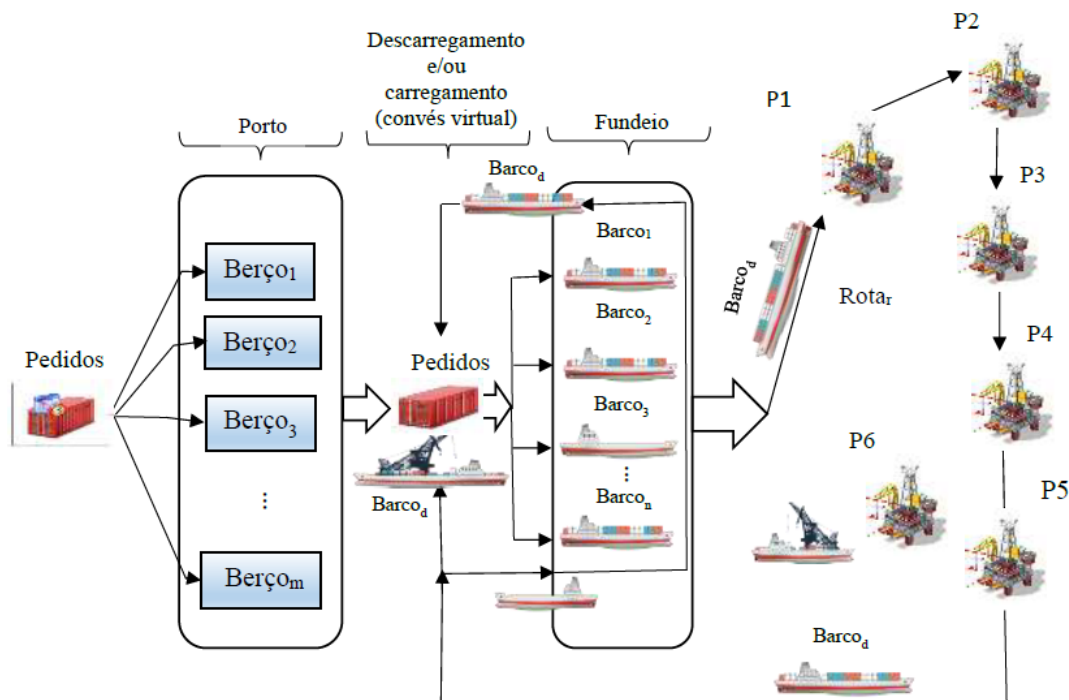


Figura 1.5: Sistema de abastecimento com duas instalações de atendimento.

Observando que o sistema descrito na Figura 1.5 é bastante complexo, propõe-se a modelagem de cada instalação (Porto e convés virtual) separadamente: A primeira instalação é composta por pedidos recebidos e vários berços, a fila de pedidos pode ser servida por um berço ou mais; A segunda instalação é um convés virtual, onde os pedidos atendidos na primeira instalação são finalmente atendidos pelas embarcações de abastecimento, por meio de viagens circulares do convés virtual para as unidades offshore e retornam ao porto.

1.2 Premissas e suposições

Como foi aludido na seção anterior, as chegadas dos pedidos no porto são programadas e ocorrem em intervalos de tempos iguais. Por isso, os tempos entre chegadas dos pedidos têm distribuição degenerada. Assume-se, nesta tese, que: os tempos de serviço dos berços são exponenciais, os tempos de viagem das embarcações são exponenciais, os berços têm a mesma taxa de serviço, as embarcações têm a mesma taxa de serviço e a frota das embarcações é homogênea.

1.3 Abordagem

Um modelo geral para cada instalação, a ser empregue neste estudo, é o modelo $GI/M/B$ introduzido pelo KENDALL (1953) e posteriormente abordado pelo NEUTS (1978). O pressuposto de que os serviços são exponenciais é devido à grande variação do processo de Poisson que se segue, o que fornece um modelo conservador no caso da distribuição do serviço real ser desconhecida. Além disso, proporciona uma relativa facilidade matemática, permitindo usar um modelo semi-Markov para o sistema de filas.

Em uma única instalação, o modelo $GI/M/B$ pode ser tratado como um processo semi-Markov (BAILY e NEUTS, 1981; NEUTS, 1978). O último trabalho propôs uma solução aproximada ao problema, truncando a cadeia de Markov embutida resultante, que tem dimensão infinita. SELVI e ROSENSHINE (1983) aplicaram o modelo para resolver um problema de transporte em aeroporto, enquanto que GUHA *et al.* (2016) abordaram o cálculo de probabilidades de estado estacionário de sistemas com capacidade finita. Esses autores truncaram a Cadeia de Markov de infinitos estados para solucionar.

Para lidar com a questão da dimensionalidade, ZHANG e HO (1991) e CAO *et al.* (2002) desenvolveram uma idéia interessante de decompor a cadeia em partes menores, uma idéia que é empregada neste trabalho. O trabalho de CAO *et al.* (2002) baseia-se nos conceitos fundamentais de desempenho potencial desenvolvidos por CAO (1999). Muitas obras empregam essa abordagem, em particular, para resolver os Processos de Decisão de Markov. Exemplos incluem FORESTIER e VARAIYA (1978), ALDHAHERI (1991), WAN e CAO (2006), ARRUDA e FRAGOSO (2011) e LI e XINYU (2016). Nesta tese em particular, faz-se o uso da abordagem de agregação temporal proposta pelo CAO *et al.* (2002) para encontrar uma formulação equivalente que mantenha o mesmo desempenho a longo prazo.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

1.4.1 Objetivos principais

- Propor um método analítico usando Cadeias de Markov embutidas com infinitos estados e agregação temporal, para analisar a operação do porto e apoiar o dimensionamento de uma frota de embarcações que atendem as unidades marítimas, considerando a capacidade do porto, as incertezas na demanda e nos tempos de operação, de modo que o tempo de espera seja mínimo e que não haja ociosidade dos recursos do mesmo sistema.
- Propor um procedimento usando os tempos de permanência, para calcular as probabilidades de estado estável do sistema de interesse.

1.4.2 Objetivos secundários

- Avaliar a produtividade dos atendentes do sistema de interesse, usando a metodologia proposta.
- Avaliar o sistema de interesse usando a metodologia proposta.
- Comparar os desempenhos de várias frotas de embarcações de um sistema de abastecimento, de modo a encontrar uma frota apropriada, usando a abordagem analítica.

Uma característica distintiva da abordagem proposta é que a formulação equivalente não se limita a um subconjunto finito do espaço de estados. Em vez disso, incorpora-se à modelagem do processo semi-Markov original um processo semi-Markov de dimensão infinita que descreve o sistema quando todos os servidores estão ocupados. Isso, por sua vez, permite encontrar uma solução fechada para o processo embutido por meio de um modelo GI/M/1 (GROSS *et al.*, 2008). Então, fazendo o uso da agregação temporal, pode-se combinar essa solução com a análise transitória no restante do espaço original, que descreve o sistema ocioso e parcialmente ocioso, para encontrar a solução do problema original. Isso é também uma novidade no que diz respeito à agregação temporal, que não avalia as probabilidades de estado estacionário do sistema fora do domínio embutido. Essa abordagem leva a um espaço de estados reduzido, o que pode levar a uma redução substancial nas equações computacionais e de armazenamento. Além disso, a solução é exata sem necessidade de aproximação.

Para resolver os problemas de filas em cada instalação, aplicou-se a abordagem da modelagem descrita em BAILY e NEUTS (1981). No entanto, para evitar a necessidade de um procedimento algorítmico que faça uso do truncamento, combinou-se essa abordagem com a agregação temporal. Isso permite combinar uma solução analítica em forma fechada com uma análise transitória dentro de um processo de semi-Markov de dimensões finitas, a fim de determinar a distribuição estacionária do processo original sem que ele precise recorrer aos métodos aproximados ou truncados.

O método é aplicado na avaliação do sistema logístico descrito na Figura 1.5, para fornecer uma avaliação da ocupação desse sistema e outras medidas de desempenho a longo prazo.

1.5 Contribuições

As contribuições desta tese são duas. A princípio, introduz-se um método analítico baseado em cadeias de Markov embutidas com ciclos de renovação e recompensa para avaliar sistemas GI/M/B sem a necessidade de truncar ou aproximar a solução, uma necessidade que surge nos modelos GI/M/B clássicos.

Uma característica inovadora da abordagem proposta é que, ao contrário da agregação temporal, isso nos permite encontrar as probabilidades de estado estacionário de todos os estados no domínio original. Um subproduto disto é que podemos avaliar o sistema sob qualquer medida de desempenho. Ao mesmo tempo, a agregação temporal avalia o desempenho das trajetórias de saída na cadeia embutida sob uma determinada medida de desempenho, produzindo assim a solução apenas para essa medida de desempenho.

Após isso, aplica-se a formulação proposta para resolver um sistema de abastecimento de dois estágios, incluindo berços do porto e uma frota de embarcações destinadas a servir unidades offshore de produção de petróleo. A formulação proposta permite avaliar o desempenho tanto dos berços do porto quanto do convés virtual, ao mesmo tempo em que apoia as decisões de dimensionamento da frota.

O processo de renovação de Markov é um processo de contagem que acompanha o número total de visitas a cada estado (GROSS *et al.*, 2008). As obras de ROSS e PEKOZ (2007) e KARLIN e TAYLOR (1975) são fundamentais para o conceito do processo de renovação e recompensa.

1.6 Organização do trabalho

Esta tese está organizada da seguinte forma: No capítulo 2 faz-se a revisão bibliográfica. O capítulo 3 faz a definição do problema. A descrição dos modelos de teoria de filas para o problema de carregamento no porto e dimensionamento de frota é feita no capítulo 4. O exemplo de aplicação está no capítulo 5 e é constituído por um problema exemplo, descrição de dados e discussão dos resultados. Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Preliminares

Neste capítulo, a princípio apresenta-se uma breve abordagem sobre logística offshore. Essa abordagem é constituída pelo conceito de logística offshore, descrição dos tipos de operações das atividades no sistema logístico, setores da logística offshore e pelo conceito da Base de Apoio. Posteriormente, são também apresentados os tipos de cargas, unidades marítimas e tipos de embarcações de abastecimento às unidades offshore. A outra abordagem desse capítulo é referente ao problema de dimensionamento e métodos usados para sua solução. Finalmente, são descritos os modelos elementares e intermediários da teoria das filas e suas aplicações.

2.2 Logística offshore

A Logística offshore consiste no suprimento de sondas de perfuração e unidades de produção para o seu funcionamento (AAS *et al.*, 2009). Assim, as unidades de produção, as sondas de perfuração, dutos, as embarcações de abastecimento são os clientes do sistema logístico offshore.

Na perspectiva financeira, os custos para o funcionamento da logística upstream em geral são altos. Dai que se a logística falhar as consequências podem ser negativas. Por isso, antes de implementar qualquer atividade é necessário avaliar cuidadosamente o custo/benefício logístico de modo que se possa produzir de forma rentável (AAS, 2008).

Para atender às atividades de sondagem, perfuração e produção de petróleo offshore é necessário o planejamento logístico de todas as atividades de apoio e suporte. Mas durante a fase do planejamento todas as atividades devem ser consideradas, tendo em conta que as atividades de exploração e produção de petróleo e gás no alto mar têm como suporte o sistema logístico e o sistema de serviço (LEITE,

2012).

No sistema logístico as atividades podem ser divididas em dois tipos de operações: Logística de cargas e Logística de passageiros. A logística de cargas é responsável pela movimentação de todo tipo de carga para as atividades de exploração e produção de petróleo e gás. Enquanto que a logística de passageiros é responsável pela movimentação de pessoas entre o porto e as unidades marítimas.

No sistema de serviço, são as embarcações que prestam serviços às unidades de produção e perfuração. Esses serviços variam desde a movimentação de âncoras até combate a incêndios ou vazamento de óleo. As principais atividades dos sistemas logístico e de serviço são apresentadas nos trabalhos de KAISER (2010) e LEITE (2012).

2.2.1 Setores da logística offshore

O sistema logístico offshore considera três setores (KAISER, 2010): o setor de transporte terrestre; setor do porto (Base de Apoio) e o setor offshore. Embora esse sistema considere três setores, são de interesse deste trabalho os dois últimos que constituem o sistema de abastecimento em estudo. Especificamente, considera-se o fluxo de pedidos no porto e o atendimento das embarcações aos pedidos para o abastecimento das unidades de produção offshore.

2.2.2 Base de apoio

A base de apoio é o porto onde se realizam as operações de carregamento (load) e descarregamento (unload) (ARPINI, 2015; LOPES, 2011). Os portos possuem berços que são locais onde as embarcações são atracadas. Ao passo que no alto mar, as cargas são transferidas das embarcações para as plataformas.

2.2.3 Carga transportada

Do ponto de vista logístico, as operações de apoio offshore abrangem a movimentação de cargas que podem ser separadas em: carga geral, fluídos, óleo diesel, granéis sólidos e líquidos (ARPINI, 2015; LOPES, 2011). Ao passo que LEITE (2012) considera que a carga pode ser classificada em carga de convés, água, diesel, fluídos, granéis sólidos, sendo que, a carga de convés divide em carga geral, alimento e água potável, tubos, risers, produtos químicos, lixo das plataformas ou backload.

Carga geral: é toda carga cujo seu carregamento realiza-se no convés das embarcações e é composta pelos seguintes tipos principais: rancho, tubos, produtos químicos e carga comum. As atividades de carregamento e descarregamento no porto ou no convés são feitas através de guindastes das plataformas ou embarcações.

Granéis líquidos: é toda carga cuja armazenagem é feita nos tanques no porão das embarcações. Os principais tipos são a água, parafina e salmoura.

Granéis sólidos: são armazenados nos tanques e silos das embarcações. Os principais granéis sólidos são: cimento, baritina e bentonita.

Óleo diesel: É transportado em tanques, debaixo do convés da embarcação de abastecimento às unidades marítimas.

Fluídos: Os fluídos mais comuns são a lama de perfuração e salmoura. Suplementa-se que, os trabalhos de ARPINI (2015), LOPES (2011) e LEITE (2012) fazem a descrição minuciosa desses tipos de cargas.

2.2.4 Unidades de produção

As unidades marítimas as quais demandam vários pedidos podem ser classificadas em: plataformas de perfuração ou sondas; plataformas de produção e embarcações especiais (ARPINI, 2015; LOPES, 2011). Segundo ARPINI (2015), cada um desses tipos difere na necessidade de cargas, emergência e incerteza na demanda.

Para THOMAS (2004), as primeiras Unidades de Perfuração Marítima eram sondas terrestres montadas sobre uma estrutura para perfurar em águas rasas. Mas com a necessidade de se perfurar em águas mais profundas surgiram novos tipos de equipamentos e técnicas especiais orientadas especificamente à perfuração marítima.

O emprego dos seguintes tipos de Unidades de Perfuração Marítima fica condicionado a distância que vai do fundo do mar até a superfície da água, condições de mar, relevo do fundo do mar, finalidade do poço, disponibilidade de apoio logístico, e sobretudo a relação custo-benefício (THOMAS, 2004):

Plataformas fixas: Foram as primeiras unidades utilizadas e geralmente são estruturas moduladas de aço que são instaladas no local de operação com estacas cravadas no fundo do mar. Essas plataformas são projetadas a fim de receber todos os equipamentos de perfuração, estocagem de materiais, alojamento de pessoal, e todas as instalações necessárias para a produção de poços.

Plataformas auto-eleváveis: São constituídas de uma balsa equipada com estruturas de apoio ou pernas que acionadas mecânica ou hidraulicamente movimentam-se para baixo até atingirem o fundo do mar. Após isso, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível da água, a uma altura segura e fora da ação das ondas. Essas plataformas são móveis.

Plataformas submersíveis: Essas plataformas constam de uma estrutura montada sobre um flutuador, utilizadas basicamente em águas calmas, rios e baías com pequena distância que vai do fundo do mar até a superfície da água.

Plataformas flutuantes: Podem ser semi-submersíveis ou navios-sonda. As semi-submersíveis são compostas de uma estrutura com um ou mais conveses,

apoiada por colunas em flutuadores submersos. Ao passo que os navios-sonda são projetados especialmente para a perfuração.

Plataforma Tension Leg: Sua estrutura é bastante similar à plataforma semi-submersível, com suas pernas principais ancoradas no fundo do mar por meios de cabos tubulares. Salienta-se que as operações de perfuração e completação são iguais às das plataformas fixas.

As plataformas de perfuração são responsáveis pela perfuração de poços produtores e exploratórios de petróleo. Entre os principais tipos de carga demandada nessas plataformas destacam-se os fluídos de perfuração, a salmoura, baritina e a bentonita.

As plataformas de produção são responsáveis pela extração do petróleo e gás natural. Essas unidades possuem um padrão de consumo mais estável e a sua localização tende a ser fixa, ao contrário das sondas que são deslocadas constantemente.

2.2.5 Embarcações

O transporte de materiais para as unidades de produção é feito por meio de embarcações de abastecimento classificadas como *Supply Vessel (SV)* e *Platform Supply Vessel (PSV)*. Essas embarcações são especializadas no apoio às plataformas, para a sua operação e a manutenção das pessoas e equipamentos.

Normalmente, as embarcações que dão suporte às operações offshore podem ser divididas por atividades desempenhadas em seis categorias (DONATO, 2012):

Supridores (*Supply*): São embarcações com o fim de transportar a carga, utilizando o convés para carregar tubos, máquinas, suprimentos e tanques para granéis líquidos e sólidos.

Rebocadores (*Tug*): São embarcações de pequeno porte e grande potência que podem ser usadas em operações de reboque de plataformas e outras estruturas. Além disso, podem ser usadas no manuseio de âncoras e espias.

Supridores/Rebocadores (*Tug/Supply*): Essas embarcações combinam a capacidade de carga e reboque, e são mais versáteis.

Embarcações para o transporte de passageiros (*Crew*): Fazem parte as lanchas, embarcações do tipo catamarã e os Swath.

Embarcações especiais (*Special Purpose*): Essas embarcações exercem atividades auxiliares para a instalação e manutenção de unidades de produção. Os insumos necessários para as suas atividades são trazidos por outras embarcações.

Algumas embarcações especiais são (ARPINI, 2015; LEITE, 2012; LOPES, 2011): embarcações de apoio ao mergulho (*Diving Support Vessels - DSV*), navios de pesquisa sísmica (*Research Supply Vessel - RSV*), embarcações de lançamento de

linhas (*Pipe Laying Vessels - PLV*), embarcações para a manutenção de unidades marítimas (*IMR Vessels*), embarcações que visam atender, em bases competitivas, à crescente demanda por embarcações de apoio marítimo (*OSRV-Oil Spill Response Vessel*) e navios de estimulação de poços de petróleo (*Well stimulation Vessels - WSV*).

Além das embarcações mencionadas anteriormente, existem as do tipo **Utility (UT)**, que são de pequeno porte, ligeiras e são usadas no transporte de pessoas que trabalham a bordo das plataformas e no transporte de carga (DONATO, 2012; LEITE, 2012).

As embarcações mais comuns usadas para o apoio à plataformas são as *Platform Supply Vessels* que são projetadas para ter grande capacidade de armazenagem com o objetivo de abastecer as instalações offshore, ou seja, transporte de mercadorias individuais. Entre elas destacam-se as seguintes (LEITE, 2012): PSV 1500, PSV 3000 e PSV 4500.

2.3 Problema de dimensionamento de frota

O Problema de dimensionamento de frota (FSP-Fleet Sizing Problem) consiste na definição do número mais apropriado de veículos a serem mantidos por um operador logístico ou por uma transportadora (REDMER *et al.*, 2000). Nesse problema destaca-se a correspondência entre a oferta da capacidade de transporte e a demanda de serviços desse transporte.

Num problema de dimensionamento de frota de embarcações recomenda-se: determinar a demanda mensal de carga, fixar os dias de trabalho por mês e as horas de trabalho por dia, verificar as rotas a serem utilizadas, determinar a velocidade da embarcação, determinar os tempos de viagem, tempo no fundeio, carregamento, descarregamento, espera, refeição e descanso.

É importante destacar a análise das especificações técnicas de cada tipo de embarcação disponível, determinando o que melhor atende às exigências do transporte. É também necessário identificar a capacidade de carga útil da embarcação escolhida, calcular o número de viagens por mês possíveis de serem realizadas por embarcação e determinar o volume da carga transportada por embarcação.

O Problema de dimensionamento de frota pode ser tratado considerando uma frota homogênea (KIRBY, 1959; WYATT, 1961) ou frota heterogênea (GOULD, 1969; PASSOS, 2008; ZAK *et al.*, 2008).

No transporte marítimo é comum deparar-se com problemas sobre o tamanho de frota de navios que normalmente são denominados de Problemas de tamanho de frota marítima (MFSP-Maritime Fleet Size Problems). Esses problemas consistem

em definir o número de navios necessários de uma frota homogênea para executar satisfatoriamente algumas tarefa de transporte (PANTUSO *et al.*, 2014).

Existem vários métodos para determinar a quantidade mais apropriada de veículos de uma frota, porém, cada um desses métodos tem uma sequência de passos que devem ser considerados. Nesse processo, a fase de levantamento de dados deve ser ressaltada uma vez que é necessário realizar com precisão, a fim de obter o comportamento e a acuracidade desses dados.

Um dos métodos usado para dimensionar uma frota de veículos é dividindo a demanda mensal de carga pela quantidade de carga transportada no mês (por veículo), considerando mais alguns veículos, de modo a manter um sistema de revisão preventiva e a substituir veículos avariados.

Além desse procedimento, é frequente a utilização dos métodos de programação matemática, simulação ou métodos heurísticos para dimensionar sistemas de interesse. Por isso, existem várias formas de classificar modelos e formulações de problemas de dimensionamento de frota.

Os modelos desses problemas podem ser classificados da seguinte forma: estático (FAGERHOLT, 1999; KIRBY, 1959; WYATT, 1961) ou dinâmico (LI e TAO, 2010; WU *et al.*, 2005); determinístico (DANTZIG e FULKERSON, 1954) ou estocástico (DIANA *et al.*, 2006; MAISIUK e GRIBKOVSKAIA, 2014; TURNQUIST e JORDAN, 1986); baseado na programação matemática (CRARY *et al.*, 2002; ZAK *et al.*, 2008), simulação (SHYSHOU *et al.*, 2010) ou combinando a programação matemática e simulação (VIS *et al.*, 2005).

Com o objetivo de determinar o número mínimo de petroleiros, DANTZIG e FULKERSON (1954) aplicaram a Programação Linear para garantir o serviço de transporte com um horário fixo. Mais tarde KIRBY (1959) e WYATT (1961) trataram o problema de dimensionamento de frota com uma frota homogênea, aplicando um modelo estático. O objetivo dos estudos de KIRBY (1959) e WYATT (1961) era de minimizar os custos fixos da frota própria e o custo de uma frota contratada. Por outro lado GOULD (1969) e FAGERHOLT (1999) trataram esse problema com modelos estáticos e frotas heterogêneas.

Os trabalhos de SHYSHOU *et al.* (2010) e MAISIUK e GRIBKOVSKAIA (2014) descrevem os modelos de simulação de eventos discretos aplicados para dimensionar frotas de navios. Esses autores fizeram a modelagem logística que avaliou a configuração alternativa da dimensão de frota para um ano, tendo em conta as incertezas sobre as condições do mar, temperatura, as operações semanais das embarcações de suprimento e algumas taxas. Para isso, SHYSHOU *et al.* (2010) basearam-se nas operações realizadas por embarcações que podiam ser contratadas ou a longo prazo ou através do pagamento à vista com taxas altas do que às de longo prazo. As contratações imediatas eram feitas assim que houvesse

escassez de embarcações, para cobrir as operações necessárias. Ao passo que, MAISIUK e GRIBKOVSKAIA (2014) estudaram as operações a partir de uma base de fornecimento. O estudo visava determinar a quantidade de embarcações de abastecimento levando em consideração as incertezas sobre as condições climáticas e os custos de contratação.

LI e TAO (2010) sugeriram a aplicação de um modelo de programação dinâmica para determinar o tamanho ideal da frota e a transferência de veículos para uma empresa especializada em aluguel de veículos. O problema foi resolvido em dois estágios.

Sob uma abordagem distinta, DIANA *et al.* (2006) aplicaram um modelo probabilístico que requer apenas o conhecimento da distribuição da demanda sobre a área e a qualidade de serviço em termos de janela de tempo, ou seja, desenvolveram um modelo analítico que considera a distribuição espacial e temporal da demanda.

RAHIMI-VAHED *et al.* (2015) determinaram a quantidade ótima de uma frota homogênea optando por um algoritmo heurístico modular e da programação inteira. A ideia desses autores era de minimizar a quantidade da frota dos três problemas de roteamento de veículos, tomando em conta as restrições de capacidade de veículos, a duração de roteamento e restrições orçamentárias.

Os modelos heurísticos foram aplicados nos trabalhos de KOÇ *et al.* (2016), YOU e HSIEH (2014), BELFIORE e YOSHIZAKI (2013). A ideia do trabalho de KOÇ *et al.* (2016) era de minimizar a soma do custo fixo do veículo, custo de depósito e custo de roteamento considerando uma frota heterogênea. Esse trabalho propôs uma formulação baseada num algoritmo heurístico para o dimensionamento, num problema de Roteamento e Localização, tendo em conta com uma janela de tempo. A semelhança do trabalho de KOÇ *et al.* (2016), o BELFIORE e YOSHIZAKI (2013) fizeram a abordagem do dimensionamento de frota com o problema de mistura de roteamento de veículos, com janelas de tempo, porém, consideraram entregas fracionadas.

A programação matemática baseada na teoria das filas é também aplicada em problemas de dimensionamento de frota, embora seja em número reduzido (ZAK *et al.*, 2008). Desse modo, alguns trabalhos propõem a aplicação dos modelos da teoria das filas para os problemas de filas do porto (EDDISON e OWEN, 1953; EDMOND e MAGGS, 1978; LEGATO e MAZZA, 2001; NICOLAOU e ASCE, 1967; NORITAKE e KIMURA, 1983; STEER e PAGE, 1961; WEILLE e RAY, 1974).

2.4 Teoria de filas

O estudo matemático de filas foi introduzido pelo ERLANG (1909, 1917) e mais tarde, vários trabalhos foram desenvolvidos pelo KENDALL (1953), KLEINROCK

(1975), COPPER (1981), BAILY e NEUTS (1981), GROSS *et al.* (2008), BHAT (2008), entre outros.

A notação abreviada ($A/B/S$) de KENDALL (1953) é amplamente usada para caracterizar as variações de sistemas de filas que levam a uma variedade de modelos. Porém, essa notação não pode caracterizar todos os modelos. Assim, a notação apresentada em GROSS *et al.* (2008) ($A/B/S/K$) e LEE (1966), como uma das versões, permite a especificação de características de outros sistemas. Desse modo, da notação do KENDALL (1953) três características foram adicionadas resultando em uma notação Kendall-Lee ($A/B/S/C/K/N$) que considera sistemas de fila única com um ou mais servidores idênticos em paralelo (ARENALES *et al.*, 2007).

Na notação Kendall-Lee, a característica A refere à distribuição de probabilidade do processo de chegada, podendo ser: degenerada (D) ou determinística (tempos constantes ou programados) ou probabilística (processo de renovação). No caso de chegada probabilística, A pode ser: M (distribuição exponencial-markoviano, sem memória), E_k (distribuição de Erlang com parâmetro de forma k), G (distribuição genérica ou geral), ou outras distribuições de probabilidade. Por convenção, quando se refere a tempos entre atendimentos, substitui-se o símbolo G por GI =distribuição independente geral.

Além da primeira característica (A), importa referir que a característica B especifica a distribuição de probabilidade do tempo de serviço, S é o número de servidores, C especifica a disciplina da fila (por exemplo: FCFC - os primeiros a chegar serão os primeiros a ser atendidos, LCFS - os últimos a chegar serão os primeiros a ser atendidos, SIRO ou GD - qualquer tipo de disciplina), K é o número máximo de usuários no sistema e N refere-se ao tamanho da população. A descrição das características da notação também pode ser encontrada em LEE (1966).

Nesta tese, as letras B e S são usadas para denotar o número de berços e o número de embarcações respectivamente. O uso das letras B e S é somente para diferenciar as características dos modelos da primeira instalação e segunda respectivamente, em relação a quantidade de servidores (berços e embarcações).

Os modelos clássicos de filas ($M/M/S$, $M/D/S$, $M/E_k/1$, $M/G/1$ e $M/G/S$) pressupõem que os tempos entre as chegadas têm distribuição exponencial com a variação das distribuições dos tempos de serviço. Os tempos de serviço dos modelos $M/G/1$ e $M/G/S$ têm distribuição geral.

No caso do modelo $M/M/S$, tanto os tempos entre chegadas quanto os tempos de serviço desse modelo são exponenciais. Ao passo que, as distribuições dos tempos de atendimento dos modelos $M/D/S$ e $M/E_k/1$ são degenerada (igual a alguma constante fixa) e Erlang, respectivamente (KENDALL, 1953).

Na maioria das vezes os tempos entre as chegadas com distribuição exponencial não são observados. Nesses casos, os modelos com tempos de serviço exponenciais e

não exponenciais podem fornecer um tratamento apropriado, tais como os modelos $GI/M/S$ (GOLDBERG, 2011; HALFIN e WHITT, 1981; WHITT, 1993; ZHAO, 1994).

A maioria dos sistemas de filas se adequa com os modelos de disciplina de prioridades. Nesses sistemas, a ordem na qual os integrantes da fila são selecionados para o atendimento se baseia nas prioridades (HORVATH, 2015; KIM *et al.*, 2016; ZHOUA *et al.*, 2017). O uso dos modelos de disciplina de prioridade normalmente fornece um refinamento adequado em relação a outros modelos frequentes. A distinção entre esses modelos é se as prioridades são *preemptivas* ou *não preemptivas*.

Perante a prioridades *preemptivas*, toda vez que um cliente com prioridade maior entrar no sistema de filas o cliente de menor prioridade que está sendo atendido é preterido ou jogado de volta para a fila (ATENCIA, 2017; DREKIC e WOOLFORD, 2005).

Quando se trata de prioridades *não preemptivas*, toda vez que um cliente com prioridade maior entrar no sistema de filas o cliente de menor prioridade que está sendo atendido não é preterido, ou seja, assim que um servidor tiver começado a atender um cliente, o atendimento tem de terminar sem interrupção. Alguns trabalhos relacionados são: KAMOUN (2008) e LEKADIR e AISSANI (2011).

Os modelos mencionados anteriormente consideram uma única instalação de atendimento. Quando os clientes são atendidos em mais de uma instalação, isso resulta num problema de redes de filas (AZARON e GHOMI, 2003; BURKE, 1956; GUO e LI, 2017; JACKSON, 1957; KIM *et al.*, 2014; VINARSKIY, 2016).

Em alguns sistemas de redes de filas, a propriedade de equivalência é usada para a obtenção da taxa de saída da primeira instalação para a segunda, e assim por diante (BURKE, 1956). Porém, essa propriedade nem sempre é útil, sobretudo quando as chegadas são programadas, ou seja, quando a distribuição dos tempos entre chegadas é degenerada. Nesses casos, a alternativa de tratar o problema por instalação com o modelo apropriado é viável.

Os modelos de filas podem ser úteis para avaliar o desempenho ou determinar a quantidade de recursos necessários (BORST *et al.*, 2004; CHAO e ZHAO, 1998). Para isso, AUSIN *et al.* (2007) usaram a abordagem Bayesiana.

A aplicação de rede de filas de uma classe fechada tem sido feita por vários autores, dentre eles destacam-se o GEORGE e XIA (2011) que tinham o objetivo de determinar a quantidade apropriada de veículos num sistema de aluguel. Ao passo que, a abordagem sobre redes de filas do GUE e KIM (2015) é referente aos múltiplos servidores acíclicos, na tentativa de obter um modelo adequado de aproximação para a distribuição dos tempos de permanência dos clientes.

Os modelos de filas também têm sido objeto de aplicação aos problemas de transporte (SELVI e ROSENSHINE, 1983; WANG *et al.*, 2014). No trabalho do

SELVI e ROSENSHINE (1983) empregou-se o modelo $D/M/S$ para estudar um problema de congestionamento de ônibus num aeroporto no horário de pico. O mesmo trabalho considerou as chegadas em lote e comparou o número de ônibus usando os métodos analítico e de simulação. Posteriormente, WANG *et al.* (2014) também formularam filas de chegadas em lotes, mas com serviço a granel, incluindo comportamentos de bloqueio e renegação de clientes usando processos compostos de Poisson.

Aplicações de modelos de filas são também feitas em problemas de portos (LEGATO e MAZZA, 2001; NORITAKE e KIMURA, 1983). Esta tese utiliza o modelo descrito pelo SELVI e ROSENSHINE (1983) para modelar um sistema portuário e dimensionar uma frota de embarcações.

No método proposto, divide-se o espaço de estados em dois subconjuntos e emprega-se a agregação temporal para simplificar a solução. Após isso, as soluções do método proposto são comparadas com as obtidas através do método convencional.

Para estudar os modelos de filas de forma pormenorizada, os trabalhos de HILLIER e LIEBERMAN (2001), ASMUSSEN (2003), KLEINROCK (1975), COPPER (1981), GROSS *et al.* (2008) e BHAT (2008) são fundamentais.

Capítulo 3

Definição do problema

3.1 Preliminares

Neste capítulo, apresenta-se de forma pormenorizada o problema do fluxo de pedidos no porto e dimensionamento de frota de embarcações de abastecimento das unidades offshore. Primeiro faz-se a caracterização do problema. Após isso, o conceito do convés virtual é apresentado. Finalmente, é também apresentada a relação entre as características do sistema de interesse e um sistema de redes de filas.

3.2 Caracterização do problema

O cenário offshore de E&P é composto por unidades estacionárias de produção, sondas de perfuração e unidades de manutenção e segurança, que funcionam como hotéis flutuantes em alto mar, tratadas aqui genericamente como UMs.

A infraestrutura de apoio logístico conta com portos, aeroportos, armazéns em terra e centros de distribuição em mar, como os navios tanque. Por sua vez, as UMs demandam serviços de cargas e descargas de materiais e insumos necessários para a realização de suas atividades. Dessa forma, a companhia contrata diversos tipos de embarcações especializadas para realizar o transporte marítimo. Os produtos demandados pelas UMs variam de acordo com o tipo e as atividades destas. Além disso, dependendo do estágio do ciclo de vida do campo explorado, há padrões diferentes de consumos. Por exemplo, na fase de perfuração de poços, há grande demanda por produtos químicos, cimento, tubos e risers. As cargas típicas podem ser classificadas como carga de convés, água, óleo diesel, fluidos e granéis (LEITE, 2012).

Carga de convés são produtos transportados nos conveses dos PSVs que podem ou não estar unitizados em containers. Tais produtos podem ser subdivididos em carga geral, comida e água potável, tubos, risers, produtos químicos e

lixo. O insumo água se refere a água industrial transportada em tanques dos PSVs. O óleo diesel também é transportado em tanques destinados para o produto. Fluidos compreendem salmoura e lama de perfuração e esses insumos também são transportados em tanques. Por fim, granéis compreendem cimento, baritina e bentonita, predominantemente, e também são transportados em tanques apropriados dos PSVs.

Para o atendimento das unidades marítimas, os produtos 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 desta tese 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).

Nesta tese, admite-se que este berço é suficiente para todas as operações de carregamento, portanto capacidades de atendimento no porto são desconsideradas. 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, 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 convés completamente carregado. O barco realiza então uma rota descarregando produtos nas unidades marítimas de acordo com o pedido realizado por elas e recolhendo produtos que devem voltar para a base em terra. Nesta tese, assume-se que, a cada dia, novas movimentações do barco são geradas a partir da alocação de demandas de clientes aos barcos disponíveis que possuam capacidade suficiente para atender o pedido e que

não esteja já em viagem ou em atendimento.

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. Nesta tese, busca-se desenvolver uma metodologia que modele o planejamento operacional, permitindo analisar a operação do porto. 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 atender a demanda com diferentes padrões de demandas estocásticas.

3.3 O conceito de “convés virtual”

O “convés virtual” consiste num lote de pedidos para os quais há operações programadas de carregamento e/ou descarregamento envolvendo um berço e uma embarcação, ou seja, é uma carga de pedidos na área de pré-embarque que sai dos berços para as embarcações. Na realidade, o “convés virtual” é uma suposição desta tese, que tem o objetivo de separar o sistema em dois estágios, permitindo dessa forma desacoplar modelos analíticos.

3.4 O sistema de carregamento no porto como um sistema de filas em série

Dado um conjunto $b_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ de berços que atende os pedidos demandados por um conjunto de unidades offshore, e posteriormente encaminhados para um conjunto $S_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ de embarcações para o seu carregamento. Sejam $n > m \geq 2$.

Consta também, que feito o carregamento de uma embarcação no porto, a mesma embarcação percorre em todas unidades de produção pertencentes à uma dada rota programada para o abastecimento de unidades offshore de exploração e produção de petróleo, e se necessário, faz a recolha do material e retorna ao porto.

Esse sistema de carregamento, que considera os berços e as embarcações, representa um sistema de redes de filas de pedidos que são atendidos nessas instalações com múltiplos servidores em paralelo para cada instalação (porto e convés virtual).

Os berços são considerados como servidores dos pedidos da primeira instalação, as embarcações são também consideradas como servidores da segunda instalação,

sendo que a tarefa de atendimento dos pedidos nas embarcações é realizada após o atendimento dos berços, ou seja, os pedidos são processados no porto, após isso, são atendidos nos berços e finalmente são encaminhados para as embarcações, a fim de abastecer as unidades de produção.

Tendo em conta que os pedidos recebem atendimento nas duas instalações, é necessário estudar sobre como resolver o problema do sistema de abastecimento de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo através da teoria de filas.

Capítulo 4

Modelos de teoria de filas para o problema de carregamento no porto

4.1 Preliminares

Neste capítulo, são descritos os modelos de filas usados para o porto (berços e convés virtual). Esses modelos são aplicados para avaliar o porto e fazer o dimensionamento da frota de embarcações. Assim, primeiro apresenta-se a visão geral do sistema em dois estágios, após isso faz-se a descrição do modelo dos berços, seu método convencional para a resolução da cadeia de Markov embutida e o método proposto para o mesmo efeito. Finalmente, o modelo de filas aplicado para o dimensionamento de embarcações é apresentado.

4.2 Visão geral do sistema em dois estágios

Muitas vezes, sistemas de abastecimento são constituídos por uma instalação de atendimento de pedidos com um ou mais servidores. Nesses sistemas, o atendimento de um pedido, no geral, depende apenas de uma única fila e um único atendente até a sua finalização. A avaliação desses sistemas, requer um tratamento igual aos sistemas monoestágio que na maioria das vezes, apenas um modelo matemático representa suficientemente o comportamento de todo sistema.

Para sistemas com duas ou mais instalações de atendimento de clientes ou pedidos, muitas das vezes, caracterizam redes de filas, pois, em cada instalação de atendimento pode ter uma fila. Nesse tipo de sistemas, o fluxo do pedido depende de pelo menos uma fila para o seu atendimento e dois ou mais servidores das instalações atenderão a esse mesmo pedido. Essas características observam-se

no sistema de abastecimento tratado neste trabalho. Assim, o sistema de interesse (Figura 1.5) possui um porto composto por vários berços, e de acordo com a teoria das filas, os berços são considerados como atendentes da primeira instalação. Além dos berços levam-se em conta as embarcações que representam os servidores da segunda instalação que é um local virtual de carregamento ou descarregamento. O atendimento do pedido é feito na primeira instalação e depois é encaminhado para a segunda.

Para uma avaliação completa do sistema de interesse, é razoável tratar dividindo por instalação, e conseqüentemente, no final agregar o resultado de cada instalação ao problema global. Portanto, o fluxo de pedidos é analisado por instalação e cada instalação é um estágio, e o serviço de cada instalação é representado por um modelo analítico. Para isso ser possível, nesta tese, introduziu-se a ideia do convés virtual.

4.3 O serviço dos berços como um modelo GI/M/B com uma cadeia de Markov embutida

Considerando que as chegadas dos pedidos na primeira instalação (porto) do sistema de interesse (Figura 1.5) ocorrem em intervalos de tempos iguais (LEITE, 2012), o modelo de filas mais apropriado para esse sistema é $D/M/B$ da classe dos modelos $GI/M/B$ de filas (GROSS *et al.*, 2008; SELVI e ROSENSHINE, 1983). Esse modelo pressupõe que os tempos entre as chegadas têm distribuição degenerada, tempos de serviço exponenciais com vários servidores.

No que diz respeito a realidade do porto, MOREIRA (2017) fez um estudo sobre os serviços dos portos de Imbetiba e Açú e das embarcações, tendo concluído que os comportamentos dos serviços não são exponenciais. Portanto, na prática, o comportamento exponencial não é observado nos tempos de serviço do porto de interesse.

Porém, nesta tese, o pressuposto de que os tempos de serviços do porto são exponenciais é uma suposição que tem por objetivo encontrar um modelo analítico que proporciona uma relativa facilidade matemática, permitindo usar um modelo semi-Markov para o sistema de filas. Essa ideia também fornece um modelo conservador e otimista para o dimensionamento de uma frota de embarcações.

Além desse pressuposto, considera-se também que a taxa de serviço é a mesma para todos os servidores, os tempos de serviço de cada instalação (porto e convés virtual) são assumidos como independentes e distribuídos de forma idêntica.

Seja X_t , $t \geq 0$, um processo estocástico que descreve o número de pedidos do serviço *ativo* na primeira instalação antes do instante de chegada do próximo pedido,

sendo que *ativo* é a quantidade de pedidos que estão aguardando na fila ou sendo atendidos nos berços do porto. Seja $\Omega = \{0, 1, 2, \dots\}$ o espaço de estados desse processo e $i \in \Omega$ denota um determinado estado do sistema. Os tempos de chegadas desses pedidos são pontos de renovação que descrevem o tempo decorrido da última chegada até o atual (COPPER, 1981; GROSS *et al.*, 2008).

Seja P a matriz de transição do processo embutido resultante $(X_t, t \geq 0)$, onde p_{ij} indica a probabilidade de que o processo atinja o estado $j \in \Omega$ imediatamente antes da próxima chegada, dado que ele ocupa o estado $i \in \Omega$ no momento da chegada atual. Se $i = 0$, haverá um pedido *ativo* imediatamente após a chegada atual. Desse modo, se um único pedido estiver sendo processado o seu atendimento tem distribuição de Bernoulli. Assim, a probabilidade de que o atendimento seja concluído dentro do período calcula-se através da seguinte equação:

$$p_{ij} = \begin{cases} \bar{p}, & j = 0 \\ 1 - \bar{p}, & j = 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

onde \bar{p} é a probabilidade do atendimento do *ativo* ser concluído antes da chegada do próximo pedido.

Pela suposição do modelo, os tempos de serviço τ são exponenciais. Por isso, segue que:

$$\bar{p} = p(\tau \leq r_a) = 1 - e^{-\mu r_a} \quad (4.2)$$

onde μ denota a taxa de serviço, $r_a > 0$ é o intervalo de tempo entre chegadas sucessivas de serviço ou tempos entre as chegadas.

Suponha que $0 < i \leq B - 1$, onde B denota a quantidade dos servidores da primeira instalação. Se i pedidos estiverem ativos imediatamente antes de uma chegada, então, logo após a chegada haverá $i + 1$ pedidos a serem processados.

Dado que $i \leq B - 1$, todos os pedidos serão atendidos durante todo o período até a próxima chegada. Uma vez que cada servidor termina o serviço com probabilidade \bar{p} (vide as equações (4.1) e (4.2)), o número de serviços concluídos indicado pela variável aleatória K ($K = i + 1 - j$) segue uma distribuição binomial com os parâmetros $i + 1$ e \bar{p} (ASMUSSEN, 2003). Assim:

$$p_{ij} = \begin{cases} P(K = 0) = (1 - \bar{p})^{i+1}, & j = i + 1, \\ P(K = i + 1 - j) = \binom{i + 1}{i + 1 - j} (\bar{p})^{i+1-j} (1 - \bar{p})^j, & 0 \leq j \leq i, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.3)$$

A Figura 4.1 ilustra as transições para $i < B$, ou seja, quando existe pelo menos um berço vazio após a chegada de um novo pedido de serviço.

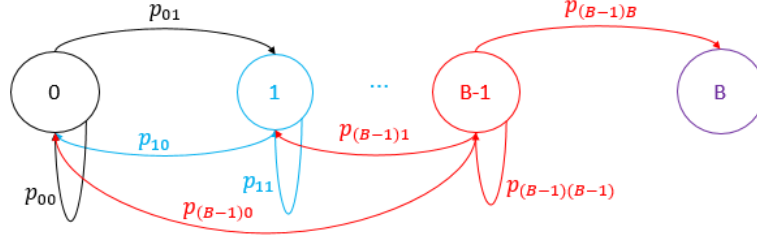


Figura 4.1: Probabilidades de transição do sistema parcialmente ocioso.

Quando o sistema está cheio, ou seja, se $X_t = i$ para $i \geq B$, os pedidos que chegam terão que estar na fila. Nesse caso, observa-se a quantidade dos pedidos que podem ser atendidos pelos B servidores em r_a unidades de tempo entre as chegadas sucessivas, caso a fila não seja esvaziada nesse intervalo. Essa quantidade é uma variável aleatória Poisson com o parâmetro $B\mu r_a$, dado que $B\mu$ é a taxa agregada de serviço quando todos os servidores estão ocupados. Para mais detalhes sobre os processos de Poisson recomenda-se o trabalho de JOHNSON *et al.* (2005).

Seja q_k a probabilidade de atender k pedidos quando o sistema está ocupado. Assim, tem-se que:

$$q_k = \frac{(B\mu r_a)^k}{k!} e^{-B\mu r_a}, \quad k \geq 0, \quad (4.4)$$

onde $k = i + 1 - j$. Por isso,

$$p_{ij} = q_k, \quad \text{para } i \geq B, B \leq j \leq i + 1. \quad (4.5)$$

As probabilidades de transição do sistema completamente ocupado são representadas na figura seguinte:

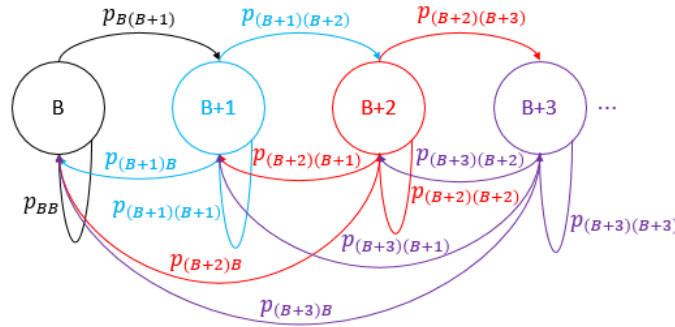


Figura 4.2: Probabilidades de transição do sistema ocupado.

As transições restantes referem-se ao caso em que $i \geq B$ e $j < B$, ou seja, quando a fila é esvaziada antes da próxima chegada. Observe que se $i + 1 > B$, então, para $j < B$, a fila deve ser esvaziada em algum momento $v < r_a$. Como os tempos de serviço são exponenciais, o tempo que os B servidores levam para finalizar os $i + 1 - B$ pedidos na fila segue uma distribuição Erlang com os parâmetros $B\mu$ e $k = i + 1 - B$, e é independente de r_a (ASMUSSEN, 2003; KLEINROCK, 1975). As probabilidades de transição para esse caso são calculadas através da seguinte equação:

$$f_V(v) = \frac{(\mu B)^{i+1-B}}{(i-B)!} v^{i-B} e^{-B\mu v}, \quad v \geq 0. \quad (4.6)$$

onde v representa o tempo que os servidores levam para finalizar a fila e atender o próximo pedido.

Supondo que a fila esteja esvaziada em $v < r_a$ unidades de tempo, o sistema completamente cheio deve atender $i + 1 - B$ pedidos, ou seja, os pedidos no sistema mais o pedido recebido no início do período em v unidades de tempo. Então, os próximos serviços ativos $B - j$ devem ser atendidos nas restantes $r_a - v$ unidades de tempo (GROSS *et al.*, 2008). Isso leva às seguintes probabilidades de transição:

$$p_{ij} = \binom{B}{B-j} \int_0^{r_a} (\bar{p}_v)^{(B-j)} (1 - \bar{p}_v)^j f_V(v) dv, \quad i \geq B, \quad j < B \quad (4.7)$$

onde $\bar{p}_v = 1 - e^{-\mu(r_a - v)}$.

Conforme pode-se observar anteriormente, a Figura 4.1 representa as transições quando o sistema está parcialmente ocioso, ou seja, há pelo menos um berço vazio após a chegada de um novo pedido. Ao passo que, a Figura 4.2 representa as transições para o sistema completamente ocupado, deixando o caso quando a fila é esvaziada antes da chegada do próximo pedido. Para ilustrar as probabilidades de transição de estados dentro do subconjunto completamente ocupado ($i \geq B$) para aqueles no subconjunto parcialmente ocioso ($j < B$), apresenta-se a Figura 4.3 abaixo.

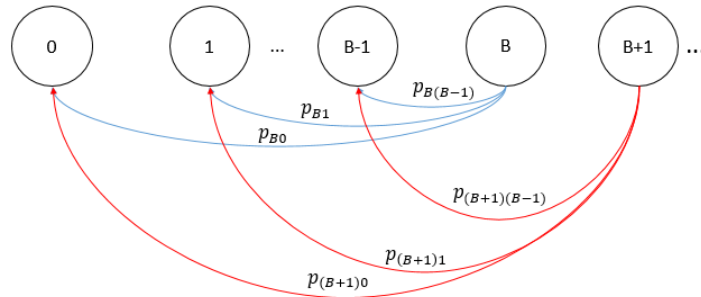


Figura 4.3: Probabilidades de transição do sistema ocupado para parcialmente ocioso.

As equações precedentes definem a matriz de probabilidades de transição (P), apresentada abaixo, para a cadeia de Markov embutida com infinitos estados considerando as transições ocorridas imediatamente antes da chegada de novos pedidos.

$$P = \left(\begin{array}{cccccc|cccc} p_{00} & p_{01} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{(B-2)0} & p_{(B-2)1} & p_{(B-2)2} & p_{(B-2)3} & \dots & p_{(B-2)(B-1)} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ p_{(B-1)0} & p_{(B-1)1} & p_{(B-1)2} & p_{(B-1)3} & \dots & p_{(B-1)(B-1)} & q_0 & 0 & 0 & \dots \\ \hline p_{B0} & p_{B1} & p_{B2} & p_{B3} & \dots & p_{B(B-1)} & q_1 & q_0 & 0 & \dots \\ p_{(B+1)0} & p_{(B+1)1} & p_{(B+1)2} & p_{(B+1)3} & \dots & p_{(B+1)(B-1)} & q_2 & q_1 & q_0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & \ddots \end{array} \right)$$

Uma vez que essas equações resultam numa cadeia de Markov de dimensão infinita, não se pode encontrar numericamente a solução de estado estável do sistema por um método clássico (BARKER e PLEMMONS, 1986). Para encontrar uma solução aproximada, é preciso encontrar uma representação aproximada e adequada do sistema. A próxima subsecção diz respeito a uma dessas representações.

4.3.1 Método convencional

Para contornar a questão da dimensionalidade infinita, BAILY e NEUTS (1981) introduziram uma regra de truncamento estabelecendo um limite superior arbitrário no estado do sistema, de acordo com as seguintes equações:

$$\sum_{j=0}^{\infty} jq_j = B\mu r_a \quad (4.8)$$

onde as quantidades q_j são dadas pela equação (4.4), e

$$\sum_{i=B-1}^{\infty} \sum_{j=0}^{B-1} p_{ij} = B\mu r_a \quad (4.9)$$

onde p_{ij} são as probabilidades de transição definidas pela equação (4.7).

Os elementos q_j são truncados para j suficientemente grande, de tal forma que:

$$\sum_{j=0}^M jq_j \geq B\mu r_a - \epsilon \quad (4.10)$$

para uma pequena tolerância $\epsilon > 0$. Após o truncamento, resolve-se iterativamente

o sistema:

$$r = r\hat{P} \quad (4.11)$$

cuja solução $r = [r_0, r_1, r_2, \dots]$ é a distribuição estacionária do sistema truncado e \hat{P} é a matriz de transição truncada (BARKER e PLEMMONS, 1986; GROSS *et al.*, 2008). Sob um truncamento apropriado, essa solução será arbitrariamente próxima de:

$$r_k = \lim_{n \rightarrow \infty} P [L_n^t = k] \quad (4.12)$$

onde L_n^t é o número de pedidos no sistema, imediatamente antes da chegada do n -ésimo pedido.

Com as probabilidades de estado estável do sistema truncado, pode-se encontrar um limite superior aproximado da taxa de saída na primeira instalação (porto), aqui indicada por λ_2 , que também representa a taxa de entrada na segunda instalação (convés virtual):

$$\lambda_2 \leq \mu \sum_{i=0}^{B-2} (i+1)r_i + \mu B \sum_{i=B-1}^{\infty} r_i. \quad (4.13)$$

O sinal de desigualdade deve-se ao fato de que o estado vazio não está contemplado no modelo embutido, dado que apenas monitora-se o sistema nos instantes de chegada do pedido e o sistema pode ficar ocioso antes dessa chegada. No entanto, a probabilidade do sistema estar ocioso pode ser avaliada considerando que, num sistema estável, devemos ter:

$$\lambda_2 = \frac{1}{r_a} \quad (4.14)$$

A importância do método de truncamento, apresentado nos trabalhos de NEUTS (1978) e BAILY e NEUTS (1981), é refletida por inúmeras aplicações na literatura. Exemplos incluem HOORN (1981), SELVI e ROSENSHINE (1983), ZHAO (1994), WANG *et al.* (2014) e CHAUDHRY e KIM (2016).

Nesta tese usa-se a agregação temporal apresentada em CAO *et al.* (2002) para propor um método analítico, a fim de encontrar a solução de estado estável do sistema embutido sem truncamento do mesmo.

A novidade da tese é referente ao procedimento proposto para calcular as probabilidades de estado estável do sistema, a partir de dois subconjuntos de estados do sistema, usando processos semi-markovianos. A motivação é usar a solução analítica, não sujeita a erro de truncamento, ao sistema da Figura 1.5.

4.3.2 Método proposto

Conforme observado nos parágrafos anteriores, a Cadeia de Markov embutida tem infinitos estados. Para contornar esta questão, nesta tese sugere-se a partição da

mesma Cadeia de Markov em duas partes: a primeira é representada por uma sub-cadeia Markov descrevendo o sistema parcialmente ocioso. Esta sub-cadeia possui um estado de absorção, que é alcançado quando todos os servidores estão ocupados; a segunda partição descreve o comportamento do sistema quando todos os servidores estão ocupados, o que pode ser representado por um modelo de fila D/M/1 clássico, como o referenciado em JANSSON (1966). Isso acontece, porque quando o sistema está completamente ocupado, todos os servidores estão ocupados com a taxa de serviço global constante e igual a $B\mu$. Além disso, os tempos de serviço são exponenciais, permitindo aplicar um modelo D/M/1 equivalente com taxa de serviço equivalente a $B\mu$.

Observe que o sistema irá sair da partição parcialmente ocupada para a partição D/M/1 em tempo finito, dado que esta sub-cadeia é transitória e tem um número finito de estados (BREMAUD, 1999).

Dentro da partição D/M/1 faz-se o uso da agregação temporal para incorporar as trajetórias entre cada duas visitas sucessivas aos estados nesta partição. Isso nos permite derivar as medidas gerais de desempenho do sistema, por meio de um processo semi-Markov que pode fazer uso da solução analítica do sistema D/M/1 de JANSSON (1966), evitando assim a necessidade de truncamento. Portanto, o método proposto faz o uso das formulações de JANSSON (1966) e CAO *et al.* (2002) para encontrar a solução exata de modelos de filas GI/M/B.

Para obter as probabilidades de estado estável para o sistema original, basta avaliar a duração das trajetórias entre visitas sucessivas ao sistema D/M/1, que fornecem probabilidade a longo prazo associada ao sistema D/M/1 e, conseqüentemente, o do sistema parcialmente ocioso. Então, as probabilidades de longo prazo no último sistema podem ser encontradas por meio de uma análise do tempo de absorção.

Deve-se notar que esta tese aborda problemas com a distribuição degenerada dos tempos entre chegadas, ou seja, chegadas determinísticas, e tempos de serviço exponencialmente distribuídos. Além disso, presume-se que os serviços são independentes e distribuídos de forma idêntica (i.i.d). A abordagem proposta é explicada em detalhes nas próximas subseções. Porém, antes disso, é apresentada uma breve abordagem sobre o método de agregação temporal.

4.3.2.1 Agregação temporal

O método da agregação temporal consiste na redução do conjunto de estados do sistema, agregando os estados originais num conjunto mais fácil de gerenciar, mantendo a sua propriedade Markoviana (CAO *et al.*, 2002; CHAGAS, 2017).

O trabalho de CAO *et al.* (2002) assumiu uma cadeia de Markov ergódica de tempo discreto com espaço de estados finitos. Desse modo, os estados foram

divididos em dois subconjuntos finitos (φ_1 e φ_2).

Supondo que apenas os estados de um subconjunto (φ_1) são controláveis, grava-se o estado toda vez que a cadeia de Markov se apresentar neste subconjunto pequeno de estados controláveis. A sequência resultante se torna uma nova cadeia de Markov, denominada Cadeia de Markov embutida, que agrega a função de desempenho da cadeia original no segmento entre os dois pontos desta nova cadeia.

Na realidade, a partir desse subconjunto são avaliadas as trajetórias de todos os estados desse subconjunto (φ_1) para o outro subconjunto (φ_2). Assim converte-se o problema da cadeia original no mesmo problema para a cadeia embutida, mas com um número muito menor de estados (CAO *et al.*, 2002; CHAGAS, 2017). O custo médio a longo prazo desse processo é dado pela equação 4 de CAO *et al.* (2002).

Nesta tese, considera-se uma cadeia de Markov de infinitos estados. Dividem-se os estados em dois subconjuntos (Ω_1 e Ω_2). O primeiro subconjunto (Ω_1) é finito e o segundo (Ω_2) é de infinitos estados. Ao invés de trabalhar com estados do subconjunto Ω_1 e avaliar as trajetória para o Ω_2 , foi considerado o subconjunto Ω_2 como o subconjunto controlável. A sequência dos estados de Ω_2 se torna uma nova cadeia de Markov embutida, e a partir da solução analítica dessa cadeia dos estados do subconjunto Ω_2 avaliam-se as trajetórias para o outro subconjunto (Ω_1), permitindo obter o custo médio. Os trabalhos de CAO *et al.* (2002), ARRUDA e FRAGOSO (2011) e CHAGAS (2017) também fazem a abordagem do método de agregação temporal.

4.3.2.2 Sub-cadeia de Markov do sistema parcialmente ocioso

A primeira partição da cadeia completa resulta em uma sub-cadeia de Markov com um estado absorvente. Essa sub-cadeia é composta por todos os estados iniciais da cadeia de Markov completa (P) até o estado $i = B$, que é o estado absorvente e é alcançado assim que o sistema estiver completamente ocupado. Para essa sub-cadeia, faz-se $p_{BB} = 1$ como é apresentado na seguinte figura.

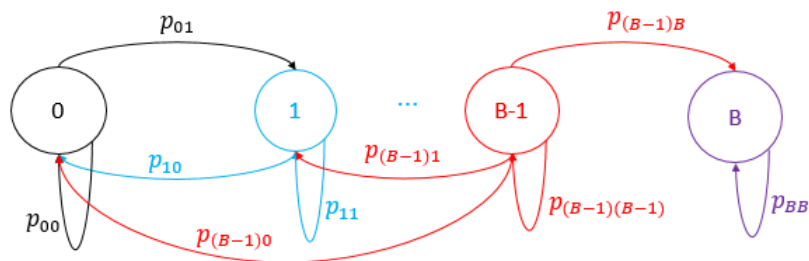


Figura 4.4: Probabilidades de transição do sistema parcialmente ocioso com estado absorvente.

A Figura 4.4 apresenta as probabilidades de transição da primeira partição e todas as probabilidades de transição dessa partição são dadas pelas equações (4.1) e (4.3). O espaço de estados considerando apenas os estados transitórios é denotado por $\Omega_1 = \{0, 2, \dots, B - 1\}$.

A sub-cadeia de Markov com estado absorvente representa o sistema parcialmente ocioso e sua matriz de transição é indicada por M_1 . A matriz de transição possui convenientemente a forma (BREMAUD, 1999):

$$M_1 = \begin{pmatrix} Q & R \\ O & I \end{pmatrix}$$

onde Q é a sub-matriz das probabilidades de transição entre estados transientes; R é a sub-matriz que expressa as probabilidades de transição entre estados transientes e ergódicos (aos absorventes); O é a sub-matriz dos zeros; e I é a sub-matriz de identidade de dimensão apropriada. Essa sub-matriz especifica que, uma vez que o processo entra no conjunto dos estados ergódicos, o processo jamais deixa esse estado novamente, ou seja, permanece nesse estado indefinidamente.

Os tempos de permanência no sistema parcialmente ocioso podem ser obtidos a partir da matriz E definida da seguinte forma:

$$E = (I - Q)^{-1} \quad (4.15)$$

Cada elemento (e_{ij}) indica o número esperado de vezes em que o estado j será visitado antes da absorção, dado que a permanência começou no estado i . Assim sendo, o tempo esperado para a absorção de qualquer estado $i \in \Omega_1$ é dado da seguinte forma:

$$\tau_1 = E * c \quad (4.16)$$

onde τ_1 é o tempo esperado para absorção e c é um vetor coluna cujos componentes são unitários.

Para avaliar a taxa média de serviço calcula-se a taxa de produção agregada até a absorção, que pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\mu_a = E \cdot c_1 \quad (4.17)$$

onde c_1 é dado por:

$$c_1 = \begin{pmatrix} \mu \\ 2\mu \\ 3\mu \\ \vdots \\ B\mu \end{pmatrix}$$

4.3.2.3 Sub-cadeia de Markov do sistema ocupado

Nesta etapa usa-se a agregação temporal para incorporar o sistema dentro de uma cadeia composta pelos estados que caracterizam um sistema totalmente ocupado, que são agregados no espaço de estados $\Omega_2 = \Omega - \Omega_1 = \{B, B + 1, \dots\}$.

Importa ressaltar que o raciocínio por detrás do método de agregação temporal apresentado nesta tese, é oposto ao do CAO *et al.* (2002) que se baseou na incorporação do sistema dentro de um subconjunto finito de estados com cardinalidade reduzida (Ω_1). Nesta tese, incorpora-se o sistema dentro de um espaço de infinitos estados (Ω_2) e a cadeia de Markov incorporada resultante pode ser resolvida de forma analítica.

Cada trajetória entre visitas sucessivas ao subconjunto Ω_2 é então monitorada e embutida num processo semi-Markov cujas medidas de desempenho a longo prazo igualam as do sistema original (CAO *et al.*, 2002).

O processo semi-markov consiste num processo estocástico que transita de estado para estado de acordo com uma cadeia de Markov na qual o tempo necessário para fazer cada transição é uma variável aleatória que é uma função de ambos estados, de partida e de chegada. Esse processo registra o estado do sistema em cada ponto no tempo (GROSS *et al.*, 2008).

Para resolver o processo resultante de semi-Markov usou-se a cadeia de Markov embutida cuja matriz de transição é dada por:

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 - q_0 & q_0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 - \sum_{k=0}^1 q_k & q_1 & q_0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 - \sum_{k=0}^2 q_k & q_2 & q_1 & q_0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}. \quad (4.18)$$

Observe que as probabilidades de transição na primeira coluna representam todas as transições possíveis para o subsistema parcialmente ocupado. Observe também que as probabilidades de transição em M_2 podem ser totalmente avaliadas fazendo uso da equação (4.4). Porém, a matriz M_2 é igual à dos modelos $GI/M/1$ de filas, conforme apresentado em GROSS *et al.* (2008). Felizmente, para esses sistemas,

pode-se encontrar facilmente uma solução analítica para as probabilidades a longo prazo.

Nesta tese, aproveita-se essa solução analítica para evitar a necessidade de truncar o sistema. Finalmente, para incorporar as trajetórias entre visitas sucessivas no Ω_2 usa-se a matriz E definida na equação (4.15).

4.3.2.4 Probabilidades de estado estável do sistema totalmente ocupado

Assumindo que o sistema seja estável, ou seja, que a cadeia de Markov embutida do subsistema totalmente ocupado é ergódica, existe uma solução única para a equação (4.11) que, sem truncamento, envolve a resolução de um sistema linear de dimensão infinita, que se busca evitar aqui. Em vez disso, usamos a proposta de JANSSON (1966), que apresenta uma solução analítica para o modelo $D/M/1$ com a matriz de transição dada por (4.18).

Seja π_i a probabilidade de longo prazo de estado $i \in \Omega_2$ no sistema completamente ocupado. Então, após uma re-rotulagem apropriada do espaço de estado o JANSSON (1966) fornece:

$$\pi_i = (1 - \delta)\delta^{i-1}, \quad i \geq B. \quad (4.19)$$

Na expressão anterior, δ é a solução de $\delta = e^{-B\mu r_a(1-\delta)}$ com o valor absoluto muito pequeno e pode ser obtido iterativamente (GROSS *et al.*, 2008) lembrando que r_a é o intervalo de tempo entre as sucessivas chegadas de pedidos.

Salienta-se que ao dividir a cadeia de Markov em duas sub-cadeias, pode-se encontrar facilmente uma solução analítica para o subsistema totalmente ocupado empregando resultados clássicos sem necessidade de realizar cálculos em grandes dimensões. Ao voltar para a rotulagem original do sistema, pode-se observar que o estado 1 no subsistema $D/M/1$ corresponde ao estado B no sistema original, ou seja, o estado absorvente do subsistema parcialmente ocioso.

4.3.2.5 Produtividade dos servidores com tempos agregados

Para caracterizar completamente a cadeia semi-Markov da subseção 4.3.2.3, precisamos encontrar as probabilidades de saltos do sistema totalmente ocupado para cada estado no sub-sistema parcialmente ocioso. Essas probabilidades são obtidas através da equação (4.7) e nos permitem encontrar o tempo total gasto pelo sistema semi-Markov em qualquer estado do sub-sistema totalmente ocupado. Na prática, este é o tempo médio das trajetórias entre duas visitas consecutivas ao subconjunto Ω_2 , começando no estado $i \in \Omega_2$. Para cada estado $i \in \Omega_2$, pode ser descrito o seguinte:

$$h_1(i) = 1 + \sum_{j \notin \Omega_2} p_{ij} \tau_{1j}$$

$$h_f(i) = B\mu + \sum_{j \notin \Omega_2} p_{ij} \mu_{aj}$$

onde τ_{1j} e μ_{aj} são os j -ésimos elementos dos vetores das equações (4.16) e (4.17) respectivamente. Com isso, pode-se calcular o tempo médio dos ciclos de renovação dentro do sistema completamente ocupado, dado por:

$$\eta = \sum_{i=B}^{\infty} \pi_i h_1(i). \quad (4.20)$$

As taxas agregadas do serviço, por outro lado, podem ser expressas como se segue:

$$f = \sum_{i=B}^{\infty} \pi_i h_f(i). \quad (4.21)$$

Consequentemente, a taxa média de serviço λ_2 pode ser obtida como (CAO *et al.*, 2002):

$$\lambda_2 = \frac{f}{\eta}. \quad (4.22)$$

Lembrando que λ_2 é um limite superior da taxa do serviço, dado que o modelo embutido não contabiliza os períodos em que todos os servidores estão ociosos. No entanto, a probabilidade do sistema estar ocioso pode ser inferida aplicando a equação (4.14).

4.3.2.6 Probabilidades de estado estável do sistema ocupado e parcialmente ocioso

A partir da Proposição 2 do CAO *et al.* (2002), pode-se inferir a probabilidade de que o sistema original esteja operando dentro da sub-cadeia totalmente ocupada da seguinte forma:

$$p_{\text{busy}} = \frac{1}{\eta} \quad (4.23)$$

onde η é obtido a partir da equação 4.20.

O resultado é bastante intuitivo em que η dá o tempo médio de uma trajetória fora de Ω_2 e, portanto, o inverso deve dar a frequência com a qual este subconjunto é visitado. Segue-se consequentemente que a probabilidade do sistema estar parcialmente ocioso é:

$$p_{\text{idle}} = 1 - p_{\text{busy}}. \quad (4.24)$$

Assim sendo, dadas as probabilidades a priori de que o sistema está evoluindo

no sub-sistema parcialmente ocioso ou na contraparte totalmente ocupado, pode-se encontrar as probabilidades de longo prazo para todos os estados do sistema original, avaliando as probabilidades de longo prazo de cada estado em seu respectivo sub-sistema e usando resultados clássicos de probabilidade condicional. Na subseção seguinte faz-se a descrição desse procedimento.

4.3.2.7 Probabilidades de estado estável do sistema original

Para os estados $i \in \Omega_2$, temos as probabilidades de estado estável condicionais, dado que o sistema está no modo totalmente ocupado, dadas pela equação (4.19). Essas, combinadas com a probabilidade a priori de que o sistema está em tal modo, dada pela equação (4.23), resultam na probabilidade incondicional a longo prazo para os estados $i \in \Omega_2$, que aparecem abaixo:

$$r_i = \pi_i \cdot \frac{1}{\eta}, \quad i \geq B. \quad (4.25)$$

Agora, para avaliar as probabilidades a longo prazo quando o sistema está evoluindo no modo parcialmente ocioso dado que a distribuição inicial no momento em que o sistema atinge o modo parcialmente inativo é $f_0(i)$, $0 \leq i < B$, empregamos a seguinte expressão:

$$\pi_F = \frac{f_0^T E}{f_0^T \tau_1}, \quad (4.26)$$

onde E é dado pela equação (4.15) e $f_0^T E$ fornece o número médio de vezes que cada estado $i \in \Omega_1$ é visitado antes do sistema retornar para Ω_2 , enquanto que τ_1 é dado pela equação (4.16) e $f_0^T \tau_1$ é o tempo total de permanência no Ω_1 . Como pode ser observado, o vetor f_0^T é a transposição do vetor $f_0(i)$, e $f_0(i)$ é um processo de contagem que guarda a frequência total de visitas em cada estado do sistema parcialmente ocioso. Assim, para o cálculo de $f_0(i)$ considera-se o seguinte teorema:

Teorema 1 *Suponha que*

$$f_0(i) = \frac{\sum_{j \in \Omega_2} p_{ji} \pi(j)}{\sum_{i \notin \Omega_2} \sum_{j \in \Omega_2} p_{ji} \pi(j)}, \quad (4.27)$$

de (4.27) obtém-se a equação (4.26). Então,

$$\pi_F(i) = \frac{r_i}{p_{idle}} \quad (4.28)$$

Prova 1 *O numerador da equação (4.27) fornece a probabilidade de estado estável de alcançar o estado $i \notin \Omega_2$ do modo parcialmente ocioso, enquanto que o*

denominador é a probabilidade de alcançar o modo parcialmente ocioso. Portanto, é claro que $f_0(i)$ dá a probabilidade de estado estacionário de que o primeiro estado visitado em Ω_1 é i , dado que o subconjunto Ω_1 é alcançado.

Tendo em mente isso, o numerador de (4.26) fornece o número esperado de vezes que o estado i será visitado em cada permanência dentro de Ω_1 , enquanto que o denominador é o total de visitas no subconjunto Ω_1 que é o tempo de permanência total no subconjunto Ω_1 . Então, pela lei dos grandes números obtém-se a equação (4.28).

Usando o teorema anterior temos:

$$r_i = p_{\text{idle}} \cdot \pi_F(i). \quad (4.29)$$

Observe que uma aplicação original de agregação temporal em que a cadeia de Markov embutida é de estados infinitos permite produzir medidas de desempenho a longo prazo de todo o sistema. Além disso, permite avaliar o comportamento do sistema fora da cadeia embutida.

Embora a agregação temporal permita encontrar a probabilidade do sistema estar parcialmente ocioso, não fornece a distribuição de probabilidade do sistema dentro do subconjunto Ω_1 . É o Teorema 1 que permite fazer isso e, ao fazê-lo, permite recuperar as probabilidades de estado estacionário do sistema original.

Salienta-se que essa solução é obtida analiticamente e requer apenas uma inversão de matriz num subconjunto finito cuja dimensão é o número de servidores. Além disso, a solução é exata e nenhuma aproximação é necessária.

4.4 A montagem do convés como um sistema M/M/S

No convés virtual, considera-se que os tempos de serviço das embarcações são variáveis aleatórias exponenciais, independentes e identicamente distribuídos (*iid*) e que a frota é homogênea. Assume-se também, que os tempos entre as chegadas no convés virtual são variáveis aleatórias exponenciais e *iid*, pelos seguintes fatos.

A princípio considera-se uma grande variação de atendimento de pedidos nos berços do porto. Além disso, tendo em conta que o modelo a ser aplicado no convés virtual é de filas, é importante identificar o comportamento dos tempos entre chegadas nessa instalação. Obviamente os tempos entre chegadas no convés virtual são diferenças dos tempos.

Se os tempos de saída nos berços são exponenciais, os tempos entre as chegadas no convés virtual são as diferenças entre variáveis exponenciais com o mesmo

parâmetro. Desse modo, para obter a função densidade resultante dessa diferença de tempos, supôs-se que X e Y são variáveis aleatórias contínuas, independentes e identicamente distribuídas, com funções de densidade de probabilidade f_X e f_Y respectivamente, sendo que X e Y são os tempos de saída de diferentes atendentes.

A função densidade de probabilidade das diferenças dessas variáveis aleatórias (X e Y) exponenciais, independentes e identicamente distribuídas é uma distribuição Laplace ou distribuição exponencial dupla dada por (JOHNSON *et al.*, 1995):

$$f_{X-Y}(r_a) = \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda r_a} \quad (4.30)$$

Assim,

$$f_{X-Y}(r_a) = \begin{cases} \frac{\lambda}{2} e^{\lambda r_a}, & \text{se } r_a < 0 \\ \frac{\lambda}{2} e^{-\lambda r_a}, & \text{se } r_a \geq 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

onde $r_a = X - Y$.

Os sinais do valor absoluto podem ser problemáticos quando se realizam integrações. Por isso, na prática, esses sinais podem-se remover nas duas regiões de integração. Esta estratégia é útil, em geral, para lidar com integrais contendo os valores absolutos (CASELLA e BERGER, 2010).

Tendo em conta que o aspecto mencionado no parágrafo imediatamente anterior é levado em consideração e os tempos entre as chegadas são positivos ($r_a > 0$), e sendo que $f_{X-Y}(r_a) = f_{X-Y}(-r_a)$, considera-se que

$$A(r_a) = 2 \left(\frac{\mu}{2} \right) e^{-\mu|r_a|} = \mu e^{-\mu|r_a|} \quad (4.32)$$

onde $A(r_a)$ é a função densidade (resultante) de probabilidade dos tempos entre chegadas. Obviamente, a mesma é uma função densidade exponencial. Assim, o modelo considerado do convés virtual é o $M/M/S$ de filas, onde S é o número de embarcações, ou seja, o tamanho da frota.

Para avaliar a ocupação das embarcações usa-se o fator de utilização que é dado da seguinte forma (HILLIER e LIEBERMAN, 2001):

$$\rho = \frac{\lambda_2}{S \times \mu_2} \quad (4.33)$$

onde λ_2 é a taxa de chegada no segundo estágio, avaliada pelo método proposto através da equação (4.22) e μ_2 é a taxa de serviço por embarcação.

As probabilidades de estado estável do convés virtual são obtidas da seguinte

forma (HILLIER e LIEBERMAN, 2001):

$$\pi_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{S-1} \frac{(\lambda_2/\mu_2)^n}{n!} + \frac{(\lambda_2/\mu_2)^S}{S!} \frac{1}{1 - (\lambda_2/(S\mu_2))} \right]} \quad (4.34)$$

e

$$\pi_n = \begin{cases} \frac{(\lambda_2/\mu_2)^n}{n!} \pi_0 & \text{if } 0 \leq n \leq S \\ \frac{(\lambda_2/\mu_2)^n}{S! S^{n-S}} \pi_0 & \text{if } n \geq S \end{cases} \quad (4.35)$$

O número esperado de pedidos (L_q) na fila e o tempo médio de espera (W_q) são calculados da seguinte forma (HILLIER e LIEBERMAN, 2001):

$$L_q = \frac{\pi_0 (\lambda_2/\mu_2)^S \rho}{S!(1-\rho)^2} \quad \text{and} \quad W_q = \frac{L_q}{\lambda_2} \quad (4.36)$$

Para determinar o tamanho da frota como uma função do tempo de espera (ω_q) de cada pedido individual na fila com certa probabilidade cumulativa (ex. 80%, 85%, 90%, 95% e 99%), pode-se empregar a distribuição do tempo de espera para cada pedido, a fim de garantir que seja menor ou igual a um certo limiar t ($\omega_q \leq t$). Os resultados clássicos do tamanho da frota de embarcações (S) são obtidos da seguinte forma:

$$S = \frac{\log \left[\frac{1 - P\{\omega_q \leq t\}}{1 - P\{\omega_q = 0\}} \right]}{-t\mu_2 \left(1 - \left(\frac{\lambda_2}{S\mu_2} \right) \right)} \quad \text{for all } t > 0 \quad (4.37)$$

onde

$$P\{\omega_q = 0\} = \sum_{n=0}^{S-1} \pi_n \quad (4.38)$$

e

$$P(\omega_q \leq t) = 1 - P(\omega_q > 0)e^{-(S\mu_2 - \lambda_2)t} \quad (4.39)$$

com π_n denotando a probabilidade estacionária de ter n serviços *ativos* no convés virtual e é obtido através da equação (4.35).

Capítulo 5

Exemplo de aplicação

5.1 Preliminares

Neste capítulo, a princípio faz-se uma breve descrição do problema exemplo. Após isso, os dados, variáveis e os parâmetros são também descritos. Seguem-se os resultados e análises. Para obter os resultados, dois cenários de experimentos foram realizados. No primeiro cenário faz-se a avaliação do porto e no segundo o dimensionamento de uma frota de embarcações. Salienta-se que todos os resultados foram obtidos usando o R versão 3.3.0 e Matlab versão R2016a.

5.2 Problema exemplo

O estudo de caso apresentado nesta subseção é inspirado pela operação de uma empresa petrolífera brasileira que envia por semana suprimentos para suas unidades offshore (LEITE, 2012). Uma grande frota de embarcações opera transportando pedidos de alimentos e suprimentos de um porto dedicado para as unidades offshore, que estão divididas em várias rotas.

Na ótica desta tese, um pedido é a quantidade total de suprimentos a serem levados para todas as unidades dentro de uma determinada rota. As embarcações são atribuídas à rotas. Normalmente, os navios servem mais de 50 rotas (viagens) a cada semana.

O porto tem 6 berços, mas um deles na maioria das vezes é dedicado à embarcações especiais e materiais urgentes. Assim, a presença de um grande número de embarcações e o número limitado de berços disponíveis para o carregamento tornam a atividade portuária bastante competitiva. Por isso, é necessário analisar o fluxo de pedidos para avaliar a utilização do porto e definir um número apropriado de embarcações para o suprimento de unidades de produção.

5.3 Dados, variáveis e parâmetros

Como foi aludido na introdução desse capítulo, os experimentos desta tese foram divididos em dois cenários. No primeiro cenário (seção 5.4) utiliza-se um exemplo de base para validação do método proposto e é comparado com o convencional. Os tempos médios de serviços dos berços do porto são a média dos tempos totais de pier.

No segundo cenário (seção 5.5) faz-se o dimensionamento das embarcações. Os dados utilizados para a obtenção do tempo de operação no porto das embarcações são referentes aos tempos totais de pier. Foi também coletada a informação sobre os tipos e a quantidade das embarcações utilizadas para o abastecimento.

Recorda-se que, esta tese considera que todos atendentes têm o mesmo tempo médio de atendimento, e por conseguinte, a mesma taxa de atendimento. Além disso, considera também que a frota é homogênea e que o modelo apropriado para o dimensionamento da frota é o $M/M/S$. Ambos tempos de serviço, nos berços e no convés virtual, são exponencialmente distribuídos.

Para calcular o tempo total de operação das embarcações foram considerados os tempos de viagens das embarcações (várias rotas) levando em conta o tempo médio de operação dessas embarcações no porto.

A taxa média de serviço dos berços (μ) foi estimada através da média (\bar{y}) obtida a partir dos dados sobre o tempo total de serviço dos berços portuários. Assim, para a análise, foram usados três tempos médios ($\bar{y} = 12.913$, $\bar{y} = 13.32$ e $\bar{y} = 13.995$) calculados através de três conjuntos de dados reais sobre o tempo de serviço (horas) dos berços do porto.

A taxa média de serviço das embarcações (μ_2) foi estimada a partir do tempo médio de serviço das embarcações (\bar{z}) obtido a partir de uma série de tempos de viagem, que abrangem todas as viagens do porto às unidades offshore e de retorno.

Para avaliar o modelo e fornecer uma visão sobre as variações dos parâmetros de saída à medida que variamos os dados de entrada, realizou-se uma série de experimentos. Variou-se a quantidade de berços disponíveis e o tempo de serviço, com vista a fornecer uma análise de sensibilidade no que diz respeito à disponibilidade de berços. Além disso, fixou-se o tempo médio de serviço dos berços (\bar{y}) e o número de berços (B), variando a quantidade que chega de pedidos $n(R)$ ou a taxa de chegada (λ_1), para avaliar a taxa de saída (λ_2) e a ocupação do porto (p_{busy}). Variou-se também o ponto de truncamento (M) do método convencional, para analisar o seu impacto na taxa de saída (λ_2), e os tempos de computação de ambos métodos foram comparados.

As medidas de desempenho de diferentes tamanhos de frotas também foram comparadas para determinar a quantidade apropriada das embarcações (S) do

sistema de interesse. Os parâmetros empregues nos modelos propostos de fila são apresentados na Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1: Parâmetros dos modelos

Parâmetro	Descrição
λ_1	Taxa de chegada dos pedidos no porto por hora
λ_2	Produtividade de berços e taxa de chegada no convés virtual por hora
μ	Taxa de serviço por berço disponível por hora
μ_2	Taxa de serviço por embarcação por hora
B	Número de berços disponíveis
S	Número de berços

A Table 5.2 descreve alguns estimadores usados. Para obter alguns parâmetros da Table 5.1 as variáveis ou estimativas da Table 5.2 foram usadas. A taxa de chegada dos pedidos no porto por hora (λ_1) foi calculada da seguinte forma:

$$\lambda_1 = \frac{n(R)}{\xi} \quad (5.1)$$

O tempo entre as chegadas dos pedidos foi obtido como se segue:

$$r_a = \frac{\xi}{n(R)} \quad (5.2)$$

onde $n(R)$ e ξ são descritos na Table 5.2.

Tabela 5.2: Estimadores e variáveis

Estimador	Descrição
\bar{y}	Tempo médio de serviço dos berços em horas
\bar{z}	Tempo médio de serviço das embarcações em horas
$n(R)$	Número de rotas por período de programação
ξ	Período de programação (168 horas)
r_a	Intervalo entre sucessivas chegadas de serviço (tempo entre as chegadas)
ω_q	Tempo de espera na fila (horas) para cada pedido
W_q	Tempo médio de espera (horas) na fila
p_{busy}	Probabilidade de que o sistema está ocupado

Além dos parâmetros do modelo, na primeira tabela dos resultados são também ilustrados os valores de M e ϵ da equação (4.10), que indicam o estado ou ponto de truncamento do sistema e a tolerância respectivamente, e $t_p(\text{Segundos})$ e $t_c(\text{Segundos})$ que são os tempos de computação em segundos do método proposto e convencional respectivamente.

5.4 Resultados e análises de experimentos do porto

No primeiro cenário de experimentos, utilizou-se um exemplo de linha de base com 51 rotas, 4 berços e um tempo médio de carregamento de 12.913 horas. Os experimentos avaliam os impactos na produtividade (taxa de saída) dos berços e na ocupação do porto à medida que o tempo de carregamento e o número de berços aumentam. A Tabela 5.3 ilustra que, para $B = 4$, a produtividade dos berços é igual para ambos métodos. Por exemplo $\lambda_2 = 0.3063$ quando $\bar{y} = 12.913$. Esse fato pode ser observado em todos os casos, ou seja, mesmo com a variação dos tempos médios ($\bar{y} = 12.913$, $\bar{y} = 13.32$ e $\bar{y} = 13.995$) os valores obtidos das produtividades dos berços são iguais para ambos métodos, e mesmo com a variação do número de berços ($B=4$, $B=5$ e $B=6$) o valor da produtividade (λ_2) é também o mesmo para ambos métodos.

A mesma Tabela 5.3 ilustra também que, para $B = 4$, o porto está completamente cheio com 95.92% de tempo. Porém, quando se aumenta o tempo de carregamento para 13.32 e 13.995 horas, a taxa de saída dos pedidos diminui, o sistema não é mais estável e obtém-se $\lambda_2 < \lambda_1$ and $p_{\text{busy}} = 1$.

Observe também que o sistema é bastante sensível a aumentos na taxa de saída quando o número de berços é aumentado para 5 ou 6. Neste caso, com o aumento do número de berços a instabilidade do sistema não é mais observada, porém, a taxa de ocupação diminui consideravelmente e o sistema está completamente ocupado apenas 48.69% no pior dos casos alcançado, quando $B = 5$ e $\bar{y} = 13.995$.

Salienta-se que, com base nesses resultados (da Tabela 5.3) pode-se constatar que fixando o número de berços e a taxa de entrada (λ_1) no sistema, um aumento do tempo médio de serviço provoca um aumento na taxa de ocupação do porto, porém, uma diminuição na taxa de saída é observada.

Fazendo uma comparação dos resultados obtidos através dos dois métodos da Tabela 5.3, pode-se constatar que os valores referentes às taxas de saída (λ_2) do método proposto são todos iguais às taxas de saída (λ_2) obtidas através do método convencional. Para a obtenção desses valores através do método convencional foi necessário realizar o truncamento no ponto $M = 105$. Os valores das tolerâncias (ϵ) são apresentados na mesma Tabela 5.3. Esses valores aumentam com o aumento do número de servidores do sistema e decrescem com o aumento do tempo de serviço com a mesma quantidade de berços. O tempo de computação que o algoritmo do método proposto gasta na execução do mesmo é sempre maior que o do método convencional, como pode ser observado na Tabela 5.3.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 também ilustram a variação da taxa de saída provocada pela variação do ponto de truncamento (M). Em cada tabela fixou-se um ponto de truncamento (M). A variação é feita de uma tabela a outra. Com base nos

resultados ilustrados nessas tabelas, houve um aumento nas taxas de saída (λ_2) com o aumento do valor do ponto de truncamento, de $M = 105$ da Tabela 5.3 para $M = 155$ da Tabela 5.4. Isso significa que se o valor do ponto de truncamento for maior, pode ser obtida uma aproximação boa das taxas de saída, ou seja, as taxas de saída são razoáveis e maiores. Porém, com tamanhos maiores do ponto de truncamento, se houver instabilidade do sistema, ou seja, $p_{\text{busy}} = 1$ com $M = 155$, as taxas de saída são diferentes entre os dois métodos. Variando o estado ou valor do ponto de truncamento, de $M = 105$ da Tabela 5.3 para $M = 55$ da Tabela 5.5, as taxas de saída estimadas diminuem. Quer dizer, que com a diminuição do valor do ponto de truncamento as taxas de saída estimadas diminuem. Portanto, valores maiores do ponto de truncamento oferecem uma boa aproximação. Neste trabalho, o ponto de truncamento considerado para o exemplo base foi o da Tabela 5.3.

Com base nos resultados e da modelagem pode-se constatar que as vantagens do método proposto são de que a princípio o método leva a um espaço de estados reduzido, o que fornece uma redução substancial nas equações computacionais e de armazenagem. Embora o tempo computacional do algoritmo do método proposto seja maior que o do método convencional, a solução é obtida sem necessidade de fazer o truncamento. Ao passo que, no método convencional o truncamento deve ser feito com M que ofereça uma boa aproximação, caso contrário a estimação da taxa de saída pode ser influenciada a obter um valor não aceitável.

A Figura 5.1 ilustra as probabilidades de estado estável no porto para o exemplo de linha de base. Como era de esperar, as probabilidades de estado estável diminuem exponencialmente com o aumento da quantidade de pedidos quando o porto está ocupado, ou seja, quando $i \geq B$, que é a partir do momento em que se atinge o pico ($i = B$). Para os estados no sistema parcialmente ocioso, quando $i < B$, as probabilidades de estado estacionário aumentam com o aumento do número de pedidos no sistema, mas não têm um comportamento definido.

Tabela 5.3: Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional

Berços	$n(R)$	λ_1	\bar{y}	μ	Método proposto			Método convencional			
					λ_2	p_{busy}	$t_p(\text{Segundos})$	λ_2	M	ϵ	$t_c(\text{Segundos})$
B=4	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3063	0.9592	3.61	0.3063	105	0.7135	2.66
			13.320	0.0751	0.2996	1	3.62	0.2996	105	0.6899	2.62
			13.995	0.0715	0.2854	1	3.55	0.2854	105	0.6567	1.94
B=5	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3299	0.3293	3.58	0.3299	105	0.9449	1.71
			13.320	0.0751	0.3270	0.3834	3.59	0.3270	105	0.9099	1.74
			13.995	0.0715	0.3220	0.4869	3.64	0.3220	105	0.8556	1.76
B=6	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3399	0.0939	3.78	0.3399	105	1.1898	1.73
			13.320	0.0751	0.3379	0.1150	3.55	0.3379	105	1.1464	1.74
			13.995	0.0715	0.3345	0.1580	3.56	0.3345	105	1.0786	1.70

Tabela 5.4: Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional

com $M=155$

Berços	$n(R)$	λ_1	\bar{y}	μ	Método proposto		Método convencional		
					λ_2	p_{busy}	λ_2	M	ϵ
B=4	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3064	0.9374	0.3064	155	0.7122
			13.320	0.0751	0.2999	1	0.3003	155	0.6880
			13.995	0.0715	0.2856	1	0.2860	155	0.6549
B=5	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3299	0.3293	0.3299	155	0.9433
			13.320	0.0751	0.3270	0.3834	0.3270	155	0.9084
			13.995	0.0715	0.3220	0.4869	0.3220	155	0.8542
B=6	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3399	0.0939	0.3399	155	1.1879
			13.320	0.0751	0.3379	0.1150	0.3379	155	1.1446
			13.995	0.0715	0.3345	0.1580	0.3345	155	1.0769

Tabela 5.5: Medidas de desempenho obtidas pelos métodos proposto e convencional

com $M=55$

Berços	$n(R)$	λ_1	\bar{y}	μ	Método proposto		Método convencional		
					λ_2	p_{busy}	λ_2	M	ϵ
B=4	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3059	0.9999	0.3059	55	0.7127
			13.320	0.0751	0.2988	1	0.2996	55	0.6887
			13.995	0.0715	0.2848	1	0.2859	55	0.6549
B=5	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3299	0.3293	0.3299	55	0.9433
			13.320	0.0751	0.3270	0.3834	0.3270	55	0.9084
			13.995	0.0715	0.3220	0.4869	0.3220	55	0.8542
B=6	51	0.3036	12.913	0.0774	0.3399	0.0939	0.3399	55	1.1879
			13.320	0.0751	0.3379	0.1150	0.3379	55	1.1446
			13.995	0.0715	0.3345	0.1580	0.3345	55	1.0769

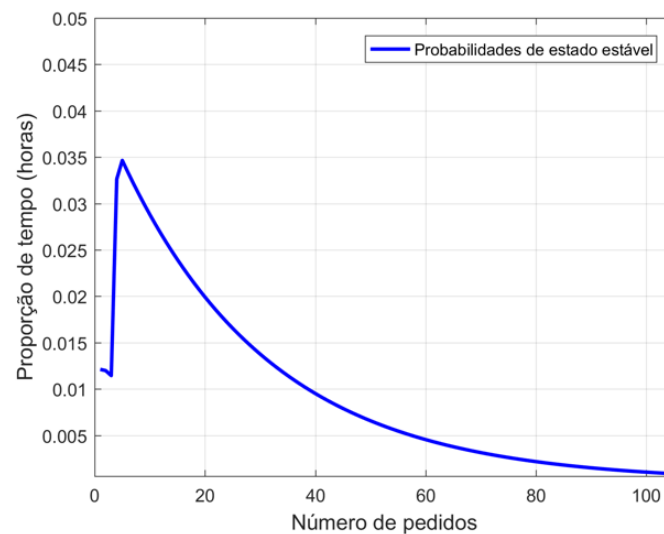


Figura 5.1: Distribuição estacionária de pedidos no porto.

Após a avaliação da validade do modelo proposto através de um exemplo base, avaliou-se também a sensibilidade do sistema portuário, quando a taxa de entrada é acrescida. Antes disso, esclarece-se que o aumento da taxa de entrada no sistema foi obtido com o aumento do número de rotas a serem atendidas. Além disso, para esse conjunto de experimentos, são considerados dois tempos médios de carregamento, $\bar{y} = 13.32$ e $\bar{y} = 13.995$. Os resultados são apresentados na Tabela 5.6 e Tabela 5.7 respectivamente.

Como foi ilustrado na Tabela 5.3, o sistema não é estável para $B = 4$. A semelhança disso, na Tabela 5.6 pode-se observar que à medida que o número de rotas aumenta, a taxa de ocupação aumenta até o sistema se tornar instável. Isso acontece para $n(R) = 63$ quando $B = 5$ e $n(R) = 75$ quando $B = 6$. Enquanto que na Tabela 5.7, isso acontece para $n(R) = 60$ quando $B = 5$ e $n(R) = 72$ quando $B = 6$. Por outro lado, esse resultado indica que uma vez dada a informação sobre os parâmetros de um sistema de atendimento (B e \bar{y}), com o modelo proposto, é possível determinar a quantidade razoável de rotas que pode ser atendida nesse sistema, no período de programação.

É importante ressaltar que da Tabela 5.6 observa-se que quando $B=5$, $\bar{y} = 13.32$ e $n(R) = 60$, a $p_{\text{busy}} = 0.8094$, ou seja, 80.94% do tempo o sistema encontra-se ocupado. Aumentando o tempo de carregamento no porto para $\bar{y} = 13.995$ (Tabela 5.7) com os mesmos parâmetros indicados, a $p_{\text{busy}} = 1$ e $\lambda_2 < \lambda_1$, ou seja, o sistema não é mais estável.

Com isso, constatou-se que com o aumento do tempo médio de carregamento, a taxa de ocupação aumenta. Porém, se esse aumento do tempo médio de carregamento provocar instabilidade do sistema ou uma ocupação muito alta, um aumento da quantidade de berços pode ser necessário. Por outro lado, o recurso na diminuição do tempo médio de carregamento sem o aumento do número de berços, pode ser também uma solução viável. Porque, como pode ser observado na Tabela 5.8, com um tempo médio de carregamento menor ($\bar{y} = 12.913$), os resultados apresentam uma taxa de ocupação considerável para uma quantidade razoável de rotas para o atendimento. Por exemplo, para $n(R) = 60$ a $p_{\text{busy}} = 0.7094$ (70.94%) e quando $n(R) = 64$ a $p_{\text{busy}} = 0.96$ (96%).

Tabela 5.6: Medidas de desempenho obtidas variando a taxa de chegada

Berços	\bar{y}	μ	$n(R)$	λ_1	λ_2	p_{busy}
B=4	13.32	0.0751	51	0.3036	0.2996	1
			52	0.3095	0.2996	1
B=5	13.32	0.0751	51	0.3036	0.3270	0.3834
			52	0.3095	0.3312	0.4198
			54	0.3214	0.3399	0.5037
			56	0.3333	0.3482	0.5956
			59	0.3512	0.3599	0.7494
			60	0.3571	0.3640	0.8094
			61	0.3631	0.3682	0.8759
			62	0.3690	0.3714	0.9621
B=6	13.32	0.0751	63	0.3750	0.3740	1
			51	0.3036	0.3379	0.1150
			52	0.3095	0.3429	0.1298
			54	0.3214	0.3534	0.1653
			56	0.3333	0.3634	0.2063
			59	0.3512	0.3779	0.2793
			60	0.3571	0.3831	0.3089
			61	0.3631	0.3883	0.3417
			62	0.3690	0.3925	0.3705
			63	0.3750	0.3968	0.4017
			70	0.4167	0.4278	0.6933
			71	0.4226	0.4315	0.7367
			72	0.4286	0.4365	0.7989
			73	0.4345	0.4402	0.8498
74	0.4405	0.4439	0.9138			
75	0.4464	0.4474	1			

Tabela 5.7: Medidas de desempenho obtidas com o aumento do tempo de serviço

Berços	\bar{y}	μ	$n(R)$	λ_1	λ_2	p_{busy}
B=4	13.995	0.0715	51	0.3036	0.2854	1
			52	0.3095	0.2854	1
B=5	13.995	0.0715	51	0.3036	0.3220	0.4869
			52	0.3095	0.3261	0.5311
			54	0.3214	0.3345	0.6322
			56	0.3333	0.3422	0.7423
			59	0.3512	0.3533	0.9500
			60	0.3571	0.3563	1
B=6	13.995	0.0715	51	0.3036	0.3345	0.1580
			52	0.3095	0.3394	0.1773
			54	0.3214	0.3495	0.2233
			56	0.3333	0.3593	0.2758
			59	0.3512	0.3733	0.3679
			60	0.3571	0.3782	0.4051
			61	0.3631	0.3832	0.4460
			70	0.4167	0.4209	0.8784
			71	0.4226	0.4242	0.9667
			72	0.4286	0.4276	1

Tabela 5.8: Probabilidade do sistema estar ocupado

Berths	\bar{y}	$n(R)$	p_{busy}
B=5	12.913	55	0.4787
		56	0.5178
		57	0.5600
		58	0.6087
		59	0.6555
		60	0.7094
		61	0.7678
		62	0.8182
		63	0.8733
		64	0.9600
B=6	12.913	67	0.4751
		68	0.5164
		69	0.5613
		70	0.5975
		71	0.6361
		72	0.6914
		73	0.7361
		74	0.7837
		75	0.8347
		76	0.8941

5.5 Resultados e análises de experimentos do convés virtual

Para o dimensionamento de frota, foram consideradas 51 rotas, uma semana de período de programação, tempo médio de viagem de 3.54 dias, 13.32 horas de carga e descarga no porto e 16 frotas de diferentes tamanhos. A Figura 5.2 ilustra as taxas de utilização das embarcações para diferentes tamanhos de frota. O resultado indica que, em todos os casos, os fatores de utilização superaram 64%. Além disso, o fator de utilização de uma frota com 37 embarcações é mais do que 80%, o que significa que mais de 80% do tempo que as embarcações estão operando. Se a frota for reduzida para além disso, obtem-se maiores fatores de utilização. O pior caso ocorre quando o tamanho da frota é 30, nesse caso, o sistema está no limiar de estabilidade, com um fator de utilização próximo a 100%. De uma forma geral quando a quantidade de embarcações aumenta o fator de utilização tende a diminuir.

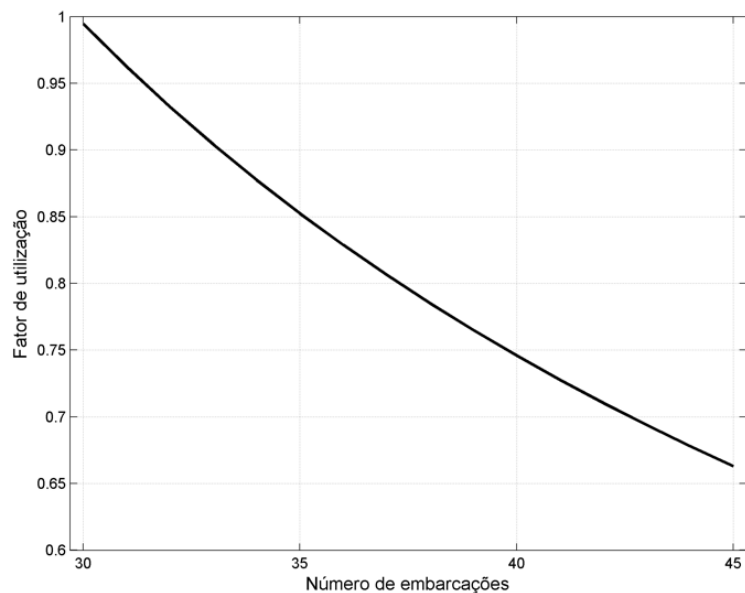


Figura 5.2: Utilização de embarcações.

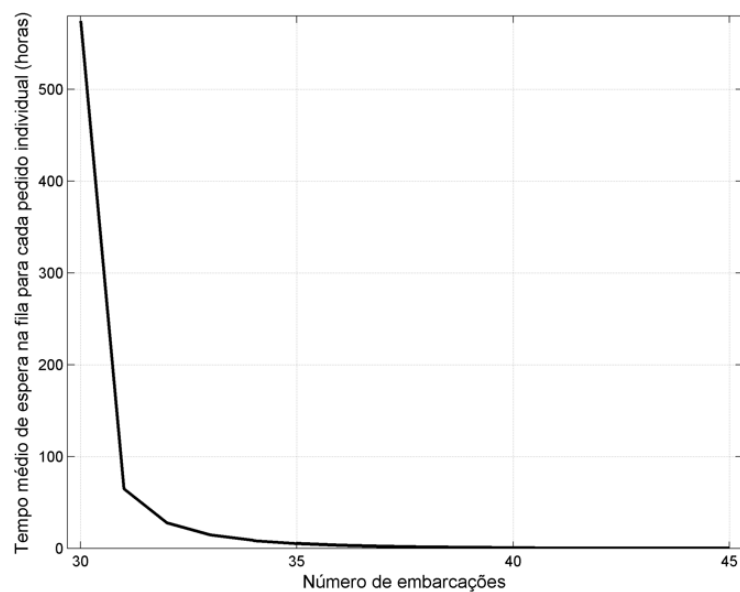


Figura 5.3: Tempo médio de espera na fila para cada pedido individual.

Tabela 5.9: Pedidos e tempo médio de espera na fila por frota

Frota	L_q	W_q
30	174.3757	574.4142
31	19.6788	64.8244
32	8.3292	27.4374
33	4.4208	14.5626
34	2.5696	8.4644
35	1.5614	5.1433
36	0.9705	3.1968
37	0.6096	2.0080
38	0.3841	1.2651
39	0.2415	0.7955
40	0.1510	0.4975
41	0.0937	0.3086
42	0.0576	0.1896
43	0.0349	0.1151
44	0.0209	0.0691
45	0.0124	0.0409

A Figura 5.3 e a Tabela 5.9 são referentes aos tempos médios de espera (W_q) de pedidos no convés virtual para diferentes tamanhos de frota. Na Tabela 5.9, também a média de pedidos no convés virtual (L_q) é apresentada. A Figure 5.3 ilustra que, quando o número de embarcações aumenta, o tempo médio de espera dos pedidos na fila diminui.

A Tabela 5.9 detalha os resultados da Figura 5.3 e evidencia uma diminuição dos tempos de espera (W_q) à medida que o tamanho da frota aumenta. Pode-se observar que com uma frota de 37 embarcações, cada pedido espera em média quase 2 horas na fila. A mesma tabela também detalha a diminuição do número médio de pedidos na fila à medida que o tamanho da frota aumenta. Pode-se notar que uma frota com 37 embarcações produz uma média de quase um pedido na fila.

A Tabela 5.10 apresenta os resultados referentes aos tempos de espera (ω_q) dos pedidos obtidos das probabilidades dos tempos de espera iguais ou inferiores a um determinado valor ($\omega_q \leq t$). Para esses experimentos, os tempos de espera dos pedidos foram computados de acordo com diferentes probabilidades acumuladas (80%, 85%, 90%, 95% e 99%) e tamanhos de frotas distintos.

Nessa tabela (Tabela 5.10) observa-se que, com uma frota de 35 embarcações, a probabilidade de uma solicitação esperar menos de 5.73 horas na fila é igual a 0.8 (80 %), que é $P(\omega_q \leq 5.73 \text{ horas}) = 0.80$. No entanto, se adicionarmos dois navios na frota, o tempo de espera na fila será reduzido para menos de 5.23 horas com probabilidade de 0.9 (90 %).

Tabela 5.10: Tempo de espera na fila para cada pedido individual

Frota	Tempo de espera (horas) na fila para cada pedido individual				
	$P(\omega_q \leq t) = 0.80$	$P(\omega_q \leq t) = 0.85$	$P(\omega_q \leq t) = 0.90$	$P(\omega_q \leq t) = 0.95$	$P(\omega_q \leq t) = 0.99$
30	937.03	1108.39	1349.89	1762.76	2721.40
31	113.55	137.82	172.03	230.49	366.27
32	50.20	63.26	81.67	113.13	186.19
33	26.46	35.39	47.99	69.51	119.49
34	13.79	20.57	30.14	46.49	84.47
35	5.73	11.21	18.92	32.11	62.73
36	0.04	4.63	11.09	22.14	47.79
37	0.00	0.00	5.23	14.74	36.81
38	0.00	0.00	0.59	8.94	28.31
39	0.00	0.00	0.00	4.23	21.49
40	0.00	0.00	0.00	0.28	15.84
41	0.00	0.00	0.00	0.00	11.04
42	0.00	0.00	0.00	0.00	6.89
43	0.00	0.00	0.00	0.00	3.23
44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Ainda na Tabela 5.10 pode-se observar que o tempo de espera é muito sensível ao tamanho da frota. Pois com uma frota de 43 embarcações, 99% dos pedidos aguardam menos de 3.23 horas na fila. Além disso, quando a frota totaliza 44 embarcações, o tempo de espera tende para zero de pelo menos 99% dos pedidos.

Quando se é menos restritivo em relação ao tempo de espera, se é capaz de reduzir a frota. Observe que, ao aumentar a frota de 36 para 37 embarcações, reduz-se o tempo de espera de 80% dos pedidos de aproximadamente 0.42 horas para zero.

Salienta-se que, como foi aludido anteriormente, o convés virtual é uma suposição desta tese com o objetivo de desacoplar modelos analíticos. Desse modo, uma espera nele, significa que os pedidos no porto terão que esperar.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho emprega uma formulação de tempos agregados para um modelo $D/M/B$, que possui uma cadeia de Markov embutida com dimensão infinita. Ao empregar a agregação temporal e dividir o espaço de estados da cadeia de Markov em dois subconjuntos, pode-se avaliar analiticamente as probabilidades de longo prazo da cadeia embutida para o sistema totalmente ocupado. Isso, combinado com uma análise de absorção no resto do espaço de estados, produz a solução exata para as equações de probabilidade no estado estacionário. Essa solução só pode ser encontrada aproximadamente pelos métodos existentes na literatura.

A formulação foi aplicada a um porto para obter medidas de desempenho e probabilidades de longo prazo, que atuam como entrada num convés virtual servido por uma frota de embarcações de abastecimento que fornece pedidos para unidades offshore distantes.

Para o exemplo de linha de base, baseado em dados reais de uma empresa petrolífera brasileira, os berços apresentam uma taxa de ocupação em torno de 95% para $B=4$ e $\bar{y} = 12.913$. Foram realizadas simulações numéricas para ilustrar a sensibilidade do modelo aos parâmetros e mostram que as taxas de ocupação diminuem à medida que novos berços são adicionados no porto. Além disso, eles também ilustram o aumento das taxas de ocupação devido ao aumento do tempo de serviço nos berços, sugerindo que grandes suprimentos de pedidos podem tornar a operação ineficiente.

A taxa de saída do porto é então alimentada para um convés virtual que é servido por uma frota de embarcações que realmente entregam os pedidos para as unidades offshore. Nesta segunda instalação, um modelo $M/M/S$ é aplicado para suportar as decisões de tamanho da frota.

Para o exemplo de linha de base, os resultados mostram que uma frota com 37 embarcações possui um tempo de espera médio de 2 horas por pedido. Ao aumentar a frota, somos capazes de reduzir o tempo de espera, não apenas em média, mas também em relação aos quantis significativos, como 90, 95 ou 99%.

6.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõe-se a considerar o sistema portuário com uma frota heterogênea, com velocidades e custos distintos. Além disso, podem-se modelar as manutenções, comparar os resultados com simulações, considerar que os berços têm tempos de serviço diferentes, o que pode acontecer por exemplo, quando os pedidos são atendidos por equipamentos diferentes, e analisar a capacidade do porto de Açú.

6.2 Trabalho resultante da tese

MUAUALO, M. A. M., ARRUDA, E. F. e FERREIRA FILHO, V. J. M. "Embedded GI/M/S models for offshore supply systems: Fleet sizing and port evaluation". *European Journal of Operational Research*, manuscript number: EJOR-D-17-02480, submission: November 2017.

Referências Bibliográficas

- AAS, B., 2008, *Upstream Logistics in Offshore Petroleum Production*. Phd theses, Molde University College, Molde, Norway.
- AAS, B., SR, O. H., WALLACE, S. W., 2009, “The role of supply vessels in offshore logistics”, *Maritime Economics and Logistics*, v. 11, pp. 302–325.
- ALDHAHERI, R. W., 1991, “Aggregation of the Policy Iteration Method for Nearly Completely Decomposable Markov Chains”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 36, n. 2, pp. 178–187.
- ANP, 2016. “Dados estatísticos”. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>>. Acesso em: 5 de Novembro de 2016.
- ANP, 2017. “Mapas Brazil Rounds”. Disponível em: <http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/mapas/Janeiro_2017/Mapa_Brasil_rounds_Jan_17.pdf>. Acesso em: 22 de Abril de 2017.
- ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., et al., 2007, *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro, Elsevier.
- ARPINI, B. P., 2015, *Planejamento da logística de suprimento de plataformas offshore por meio de um Modelo Matemático 2L-CVRP com frota heterogênea e Equilíbrio Náutico*. Dissertação de m.sc., UFES, Vitória.
- ARRUDA, E. F., FRAGOSO, M. D., 2011, “Time aggregated Markov decision processes via standard dynamic programming”, *Operations Research Letters*, v. 39, pp. 193–197.
- ASMUSSEN, S., 2003, *Applied Probability and Queues*. 2 ed. New York, Springer.
- ATENCIA, I., 2017, “A Geo/G/1 retrial queueing system with priority services”, *European Journal of Operational Research*, v. 256, pp. 178–186.
- AUSIN, M. C., LILLO, R. E., WIPER, M. P., 2007, “Bayesian control of the number of servers in a GI/M/c queueing system”, *Journal of Statistical Planning and Inference*, v. 137, pp. 3043–3057.

- AZARON, A., GHOMI, S. F., 2003, “Optimal control of service rates and arrivals in Jackson networks”, *European Journal of Operational Research*, v. 147, pp. 17–31.
- BAILY, D. E., NEUTS, M. F., 1981, “Algorithmic methods for multi-server queues with group arrivals and exponential services”, *European Journal of Operational Research*, v. 8, pp. 184–196.
- BARKER, G. P., PLEMMONS, R. J., 1986, “Convergent iterations for computing stationary distributions of Markov Chains”, *SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods*, v. 7, n. 3, pp. 390 – 398.
- BELFIORE, P., YOSHIZAKI, H. T. Y., 2013, “Heuristic methods for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and split deliveries”, *Computers and Industrial Engineering*, v. 64, pp. 589–601.
- BHAT, U. N., 2008, *An Introduction to Queueing Theory. Modeling and Analysis in Applications*. Boston-Berlin, Series Editor.
- BORST, S., MANDELBAUM, A., I., R. M., 2004, “Dimensioning Large Call Centers”, *Operations Research*, v. 52, n. 1, pp. 17–34.
- BREMAUD, P., 1999, *Markov Chains: Gibbs fields, Monte Carlo Simulation, and Queues*. United States of America, Springer.
- BURKE, P. J., 1956, “The output of a queuing system”, *Operations Research*, v. 4, n. 6, pp. 699–704.
- CAO, X. R., 1999, “Single Sample Path-Based Optimization of Markov Chains”, *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 100, n. 3, pp. 527–548.
- CAO, X. R., REN, Z., BHATNAGAR, S., et al., 2002, “A time aggregation approach to Markov decision processes”, *Automatica*, v. 38, pp. 929 – 943.
- CASELLA, G., BERGER, R. L., 2010, *Inferência Estatística*. 2 ed. São Paulo, Cengage Learning Edições Ltda.
- CHAGAS, D. L., 2017, *Planejamento da cadeia de suprimento na indústria de petróleo: uma nova abordagem utilizando Processo de Decisão de Markov*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- 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.
- CHAO, X., ZHAO, Y. Q., 1998, “Analysis of multi-server queues with station and server vacations”, *European Journal of Operational Research*, v. 110, pp. 392–406.
- CHAUDHRY, M. L., KIM, J. J., 2016, “Analytically elegant and computationally efficient results in terms of roots for the GIX/M/c queueing system”, *Queueing System*, v. 82, pp. 237–257.
- COPPER, R. B., 1981, *Introduction to Queueing Theory*. 2 ed. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- CRARY, M., NOZICK, L. K., WHITAKER, L., 2002, “Sizing the US destroyer fleet”, *European Journal of Operational Research*, v. 136, n. 3, pp. 680–695.
- DANTZIG, G., FULKERSON, D., 1954, “Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule”, *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 1, pp. 217–222.
- DIANA, M., A.M., D., N., X., 2006, “A Model for the Fleet Sizing of Demand Responsive Transportation Service with Time Windows”, *Transportation Science Part B*, v. 40, pp. 651–666.
- DONATO, V., 2012, *Logística para a indústria do petróleo, gás e biocombustíveis*. 1 ed. São Paulo, Editora Érica Ltda.
- DREKIC, S., WOOLFORD, D. G., 2005, “A preemptive priority queue with balking”, *European Journal of Operational Research*, v. 164, pp. 387–401.
- EDDISON, R. T., OWEN, D. G., 1953, “Discharging iron ore”, *Operational Research*, v. 4, n. 3, pp. 39–50.
- EDMOND, E. D., MAGGS, R. P., 1978, “How Useful are Queue Models in Port Investment Decisions for Container Berths?” *The Journal of the Operational Research Society*, v. 29, n. 8, pp. 741–750.
- ERLANG, E. K., 1909, “The theory of probabilities and telephone conversations”, *First published in "Nyt Tidsskrift for Matematik" B*, v. 20, pp. 33.

- ERLANG, E. K., 1917, “Solution of some problems in the theory of probabilities of significance in automatic telephone exchanges”, *First published in "Elektroteknikerer"*, v. 13, pp. 5.
- FAGERHOLT, K., 1999, “Optimal fleet design in a ship Routing Problem”, *International Transactions in Operational Research*, v. 6, n. 5, pp. 453–464.
- FORESTIER, J. P., VARAIYA, P., 1978, “Multilayer Control of Large Markov Chains”, *IEEE Transactions on automatic control*, v. AC-23, n. 2, pp. 298–305.
- FRIEDBERG, D. P. ., UGLANE, V. T., 2013, *Routing and Scheduling of Platform Supply Vessels*. Dissertação de m.sc., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega.
- GEORGE, D. K., XIA, C. H., 2011, “Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks”, *European Journal of Operational Research*, v. 211, n. 1, pp. 198–207.
- GOLDBERG, D. A., 2011, *Large Scale Queueing Systems: Asymptotics and Insights*. Tese de d.sc., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos.
- GOULD, J., 1969, “The Size and Composition of a Road Transport Fleet”, *Operational Research Society*, v. 20, n. 1, pp. 81–92.
- GROSS, D., SHORTLE, J. F., THOMPSON, J. M., et al., 2008, *Fundamentals of Queueing Theory*. 4 ed. New Jersey, by John Wiley & Sons, Inc.
- GUE, K. R., KIM, H. H., 2015, “An approximation model for sojourn time distributions in acyclic multi-server queueing networks”, *Computers & Operations Research*, v. 63, pp. 46–55.
- GUHA, D., GOSWAMI, V., BANIK, A., 2016, “Algorithmic computation of steady-state probabilities in an almost observable GI/M/c queue with or without vacations under state dependent balking and reneging”, *AppliedMathematicalModelling*, v. 40, pp. 4199–4219.
- GUO, Y., LI, Z., 2017, “Asymptotic variability analysis for a two-stage tandem queue, part I: The functional law of the iterated logarithm”, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*.
- HALFIN, S., WHITT, W., 1981, “Heavy-Traffic Limits for Queues with Many Exponential Serves”, *Operations Research*, v. 29, n. 3, pp. 567–588.

- HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J., 2001, *Introduction to Operations Research*. 7 ed. New York, McGraw-Hill Companies, Inc.
- HOORN, M. H. V., 1981, “Algorithms for the State Probabilities in a General Class of Single Server Queueing Systems with Group Arrivals”, *Management Science*, v. 27, n. 10, pp. 1178–1187.
- HORVATH, G., 2015, “Efficient analysis of the MMAP[K]/PH[K]/1 priority queue”, *European Journal of Operational Research*, v. 246, pp. 128–139.
- JACKSON, J. R., 1957, “Networks of Waiting Lines”, *Operations Research*, v. 5, n. 4, pp. 518–521.
- JANSSON, B., 1966, “Choosing a Good Appointment System-A Study of Queues of the Type (D, M, 1)”, *Operations Research*, v. 14, n. 2, pp. 292–312.
- JOHNSON, N. L., KOTZ, S., BALAKRISHNAN, N., 1995, *Continuous Univariate Distributions*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- JOHNSON, N. L., KEMP, A. W., KOTZ, S., 2005, *Univariate Discrete Distributions*. 3 ed. Canada, John Wiley & Sons, Inc.
- KAISER, M. J., 2010, “An integrated systems framework for service vessel forecasting in the Gulf of Mexico”, *Energy*, v. 35, pp. 2777–2795.
- KAMOUN, F., 2008, “Performance analysis of a non-preemptive priority queueing system subjected to a correlated Markovian interruption process”, *Computers & Operations Research*, v. 35, pp. 3969 – 3988.
- KARLIN, S., TAYLOR, H. M., 1975, *A first course in stochastic processes*. 2 ed. California, Elsevier.
- KENDALL, D. G., 1953, “Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain”, *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 24, n. 3, pp. 338–354.
- KIM, C., DUDIN, A., DUDINA, O., et al., 2014, “Tandem queueing system with infinite and finite intermediate buffers and generalized phase-type service time distribution”, *European Journal of Operational Research*, v. 235, pp. 170–179.
- KIM, C., V.I. KLIMENOK, V. I., DUDIN, A. N., 2016, “Priority tandem queueing system with retrials and reservation of channels as a model of call center”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 96, pp. 61–71.

- KIRBY, D., 1959, “Is your fleet the Right Size?” *Operational Research Society*, v. 10, n. 4, pp. 252.
- KLEINROCK, L., 1975, *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, John Wiley and Sons.
- KOÇ, Ç., BEKTAŞ, T., JABALI, O., et al., 2016, “The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm”, *European Journal of Operational Research*, v. 248, pp. 33–51.
- LEE, A. M., 1966, *Applied Queueing Theory*. New York, St. Martins Press.
- LEGATO, P., MAZZA, R. M., 2001, “Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation”, *European Journal of Operational Research*, v. 133, n. 3, pp. 537–547.
- 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 m.sc., PUC, Rio de Janeiro.
- LEKADIR, O., AISSANI, D., 2011, “Error bounds on practical approximation for two tandem queue with blocking and non-preemptive priority”, *Computers and Mathematics with Applications*, v. 61, pp. 1810–1822.
- LI, Y., XINYU, W., 2016, “A unified approach to time-aggregated Markov decision processes”, *Automatica*, v. 67, pp. 77–84.
- LI, Z., TAO, F., 2010, “On determining optimal fleet size and vehicle transfer policy for a car rental company”, *Computers & operations research*, v. 37, n. 2, pp. 341–350.
- LOPES, P. H. M., 2011, *Uma solução para o problema de roteamento de embarcações de apoio offshore através da Metaheurística RTR*. Dissertação de m.sc., UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.
- MAISIUK, Y., GRIBKOVSKAIA, I., 2014, “Fleet Sizing for Offshore Supply Vessels with Stochastic Sailing and Service Times”, *Procedia Computer Science*, v. 31, pp. 939–948.
- MOREIRA, P. C. M., 2017, *Análise de aumento da eficiência do sistema marítimo offshore de transporte de carga por meio de simulação probabilística*. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- NET, 2017a. “Porto de Imbetiba-Macaé/RJ”. Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/wp-content/uploads/2014/01/MacaePort.jpg>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2017.
- NET, 2017b. “Embarcação PSV para operações de suprimento”. Disponível em: <<http://www.nauticexpo.com/pt/prod/dae-sun-shipbuilding/product-30889-363928.html>>. Acesso em: 30 de Novembro de 2017.
- NEUTS, M. F., 1978, *An algorithmic solution to the GI/M/c queue with group arrivals*. In: Technical report no. 78/2, Department of Statistics and Computer Science, University of Delaware, Newark, Delaware.
- NICOLAOU, S. N., ASCE, F., 1967, “Berth Planning by Evaluation of Congestion and Cost”, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, v. 93, n. 4, pp. 107–132.
- NORITAKE, M., KIMURA, S., 1983, “Optimum number and capacity of seaport berths”, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 109, n. 3, pp. 323–339.
- PANTUSO, G., FAGERHOLT, K., HVATTUM, L. M., 2014, “A survey on maritime fleet size and mix problems”, *European Journal of Operational Research*, v. 235, n. 2, pp. 341–349.
- PASSOS, M. C. D., 2008, *Dimensionando uma Frota Heterogênea de Veículos Ótima em Tamanho e Composição*. Dissertação de m.sc., PUC, Rio de Janeiro.
- PETROBRAS, 2016. “Plano estratégico de negócios e gestão 2017-2021”. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/apresentacoes/plano-de-negocios-e-gestao>>. Acesso em: 5 de Novembro de 2016.
- RAHIMI-VAHED, A., CRAINIC, T. G., GENDREAU, M., et al., 2015, “Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm”, *Computers & Operations Research*, v. 53, pp. 9–23.
- REDMER, A., SAWICKI, P., ZAK, J., 2000, *Multiobjective Optimisation of the Fleet Size in the Road Freight Transportation Company*. in: Euro Working Group Transportation, Poznan University of Technology, Poznan.
- ROSS, S. M., PEKOZ, E. A., 2007, *A Second Course in Probability*. Boston, ProbabilityBookstore.com.

- SELVI, A., ROSENSHINE, M., 1983, “A queueing system for Airport Buses”, *Transportation Research*, v. 17B, n. 6, pp. 427–434.
- SHYSHOU, A., GRIBKOVSKAIA, I., BARCELÓ, J., 2010, “A simulation study of the fleet sizing problem arising in offshore anchor handling operations”, *European Journal of Operational Research*, v. 203, n. 1, pp. 230–240.
- STEER, D. T., PAGE, A. C. C., 1961, “Feasibility and financial studies of a port installation”, *Operational Research Quarterly*, v. 12, n. 3, pp. 145–160.
- THOMAS, J. E., 2004, *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2 ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência.
- TURNQUIST, M. A., JORDAN, W. C., 1986, “Fleet Sizing under Production Cycles and Uncertain Travel Times”, *Transportation Science*, v. 20, n. 4, pp. 227–236.
- VINARSKIY, M., 2016, “A method of approximate analysis of an open exponential queueing network with losses due to finite shared buffers in multi-queue nodes”, *European Journal of Operational Research*, v. 00, pp. 1–9.
- VIS, I., DE KOSTER, R. M. B., SAVELSBERGH, M., 2005, “Minimum Vehicle Fleet Size Under Time-Window Constraints at a Container Terminal”, *Transportation Science*, v. 39, n. 2, pp. 249–260.
- WAN, Y. W., CAO, X. R., 2006, “The control of a two-level Markov decision process by time aggregation”, *Automatica*, v. 42, pp. 393–403.
- WANG, Y., GUO, J., CEDER, A., et al., 2014, “Waiting for public transport services: Queueing analysis with balking and renegeing behaviors of impatient passengers”, *Transportation Research Part B*, v. 63, pp. 53–76.
- WEILLE, J. D., RAY, A., 1974, “The optimum port capacity”, *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 8, n. 3, pp. 244–259.
- WHITT, W., 1993, “Approximations for the $GI/G/m$ Queue”, *Production and Operations Management*, v. 2, n. 2.
- WINDECK, V., 2013, *A liner Shipping Network Design*. 1 ed. New York, Springer.
- WU, P., HARTMAN, J., WILSON, G., 2005, “An Integrated model and Solution Approach for Fleet Sizing with Heterogeneous Assets”, *Transportation Science*, v. 39, n. 1, pp. 87–103.

- WYATT, J. K., 1961, “Optimal Fleet Size”, *Operational Research Society*, v. 12, pp. 186–187.
- YOU, P.-S., HSIEH, Y.-C., 2014, “A study on the vehicle size and transfer policy for car rental problems”, *Transportation Research Part E*, v. 64, pp. 110–121.
- ZAK, J., REDMER, A., SAWICKI, P., 2008, “Multiple Objective Optimization of the Fleet Sizing Problem for Road Freight Transportation”, *Journal of Advanced Transportation*, v. 42, n. 4, pp. 379–427.
- ZHANG, B., HO, Y. C., 1991, “Performance Gradient Estimation for Very Large Finite Markov Chains”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 36, pp. 1218–1227.
- ZHAO, Y., 1994, “Analysis of the $GI^X/M/c$ model”, *Queueing Systems*, v. 15, pp. 347–364.
- ZHOUA, B., XIE, J. R., YANC, X. Y., et al., 2017, “A model of task-deletion mechanism based on the priority queueing system of Barabási”, *Physica A*, v. 466, pp. 415–421.