



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



aa/bb/cc/dd-TDI

ESTUDO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS COM RESTRIÇÕES DE MARÉ E CONTROLE DE ESTOQUE COM QUESTÕES DE MULTIOBJETIVIDADE

Victor Hugo Barros

Proposta de Tese de Doutorado do
Curso de Pós-Graduação em Nome
do Curso, orientada pelo(a) Dr. So-
lon Carvalho, aprovada em dd de
mês por extenso de aaaa.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
AAAA

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivêca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



aa/bb/cc/dd-TDI

ESTUDO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS COM RESTRIÇÕES DE MARÉ E CONTROLE DE ESTOQUE COM QUESTÕES DE MULTIOBJETIVIDADE

Victor Hugo Barros

Proposta de Tese de Doutorado do
Curso de Pós-Graduação em Nome
do Curso, orientada pelo(a) Dr. So-
lon Carvalho, aprovada em dd de
mês por extenso de aaaa.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
AAAA

Barros, Victor.
Cutter Estudo do Problema de Alocação de Berços com Restrições
de Maré e Controle de Estoque com Questões de Multiobjeti-
vidade / Victor Hugo Barros. – São José dos Campos : INPE,
AAAA.
xi + 38 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

Proposta de Tese (Doutorado em Computação Aplicada) –
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos,
2012.

Orientador : Solon Carvalho.

1. Problema de Alocação de Berços. 2. Modelagem Matemática
3. Otimização Multiobjetiva. 4. Clustering Search. I. Título.

CDU 000.000

Copyright © AAAA do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © AAAA by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**ATENÇÃO! A FOLHA DE
APROVAÇÃO SERÁ IN-
CLUIDA POSTERIORMENTE.**

Doutorado em Computação Aplicada

RESUMO

Neste trabalho é apresentada o problema de alocação de berços baseado em um cenário encontrado no complexo portuário marítimo de São Luís. As especificidades do cenário estão relacionadas à restrições dos níveis de maré, que limitam as atracações a determinadas janelas de tempo. Um controle de estoque também é necessário para garantir restrições de demanda de carga. Um novo modelo matemático é apresentado e os seus resultados comparados com um modelo anterior. Pelos experimentos, fica evidente que o novo modelo tem melhor desempenho. Além disso, como proposta foi desenvolvido um versão multiobjetiva do novo modelo e foi apresentado um esboço do mapeamento do Clustering Search para Clustering Search multiobjetivo.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Cenário típico de um porto graneleiro	2
2.1 Alocação de berços como escalonamento de máquinas	3
2.2 Tempos de um navio	5
3.1 Período de uma maré	11

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Comparação dos resultados para os 2 modelos	17
7.1 Atividades de 2010	27
7.2 Atividades de 2011	28
7.3 Atividades de 2012	28
7.4 Atividades de 2013	28
7.5 Atividades de 2014	29

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS	3
2.1 Apresentação	3
2.2 Revisão bibliográfica	5
3 COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS	11
4 MODELO	13
4.1 PGME2	13
4.2 PGME x PGME2	15
4.3 Experimentos computacionais	16
5 CLUSTERING SEARCH	19
6 PROPOSTA DE TESE	21
6.1 Modelo Multiobjetivo	21
6.1.1 Demurrage	21
6.1.2 Ultrapassagens	22
6.1.3 Proposta para PAB multiobjetivo	24
6.2 CS multiobjetivo	24
6.2.1 Geração de Clusters	25
6.2.2 Heurística	25
6.2.3 Agrupamento	25
6.2.4 Buscador Local	26
7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	27
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
APÊNDICE A - PGME.	37

1 INTRODUÇÃO

Quanto maior e mais competitivo é o comércio de mercadorias entre nações, maior é a demanda por um transporte marítimo eficiente. Mais de 80% do comércio mundial de mercadorias é transportado por via marítima (BUHRKAL et al., 2011). Silva (2008) lembra que na maioria dos países que atingiram o superávit comercial o fator predominante para isso foi privatização dos portos.

Desta forma, os serviços portuários têm sido alvos constantes de esforços no sentido de acompanhar o ritmo de crescimento econômico. Neste contexto, uma das questões mais investigadas é o *problema de alocação de berços* (PAB).

O problema de alocação de berços pode ser resumido como a determinação de onde e quando cada navio deve atracar em um dado horizonte de planejamento. O objetivo do PAB é normalmente minimizar o tempo de atendimento total dos navios. A grande diversidade de infra-estruturas dos terminais portuários resultou em uma quantidade enorme de trabalhos envolvendo portos de contêineres (BIERWIRTH; MELSEL, 2010). Entretanto, pouco tem se feito para portos que operam com navios de carga em granel, denominados *portos graneleiros*.

Os portos graneleiros brasileiros são responsáveis pela saída de grande parte da exportação agrícola, incluindo café e soja, minerais como minério de ferro, e pela entrada de derivados do petróleo. Além disso, algumas refinarias recebem matéria-prima em granel, como alumínio, em seus portos privados para produzir itens de exportação (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2011).

Na Figura 1.1 é ilustrado um cenário típico de um porto graneleiro. Enquanto alguns navios são atendidos, ou seja, são carregados ou descarregados nas posições de atracação (berços), outros esperam para serem atendidos. O transbordo das cargas é realizado por meio de esteiras até pátios de armazenagem. Não existe o problema de alocar contêineres, sendo o tempo de atendimento uma relação entre a vazão do berço e a carga do navio.

Neste contexto, é proposto uma nova modelagem para o problema de alocação de berços em portos graneleiros com restrições de maré e controle de estoque. Os experimentos realizados com esta modelagem são apresentadas na primeira parte deste trabalho e comparados com um modelagem anterior. Na segunda parte é proposta uma modelagem multiobjetivo do cenário apresentado, onde pretende-se investigar diversos critérios de otimização. Além disso, pretende-se explorar uma abordagem

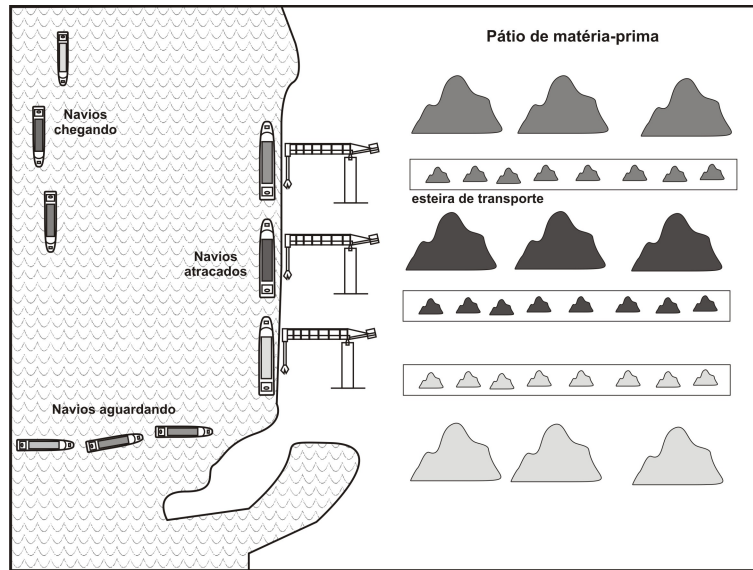


Figura 1.1 - Cenário típico de um porto graneleiro

multiobjetiva para a heurística conhecida como *Clustering Search*.

O restante deste trabalho está organizado como segue. Uma apresentação do PAB é feita no capítulo 2, sendo um *overview* na Seção 2.1. Na Seção 2.2 é feita a revisão bibliográfica do PAB. No Capítulo 4, o novo modelo desenvolvido é mostrado e seus resultados comparados com os resultados do modelo anterior. No Capítulo 6, a proposta é apresentada, com o modelo multiobjetivo apresentado na Seção 6.1 assim como o esboço do CS multiobjetivo na Seção 6.2. E, finalmente, no Capítulo 8 são feitas as considerações finais do trabalho.

2 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS

2.1 Apresentação

O problema de alocação de berços pode ser definido como o planejamento de qual posição do cais e de qual período cada navio deve ser atribuído, ou seja, onde e quando atracar (CORDEAU et al., 2005).

O PAB pode ser representado como um problema de escalonamento de máquinas (PINEDO, 2008) e (BRUCKER, 2007), onde cada navio seria equivalente a uma tarefa e os berços a um conjunto de máquinas para servi-los. Alguns ambientes de máquinas podem ser encontrados em (AK, 2008) (máquina simples), (LI; PANG, 2011) (máquinas idênticas em paralelo) e (IMAI et al., 2001) (máquinas em paralelo não-relacionadas). Na Figura 2.1 essa representação é ilustrada.

Cada retângulo numerado representa um navio ocupando um berço em determinado período e os retângulos pretos equivalem aos períodos em que o berço não foi ocupado. A numeração significa a ordem de chegada dos navios. É importante ressaltar que, nesta ilustração, as dimensões espaciais dos berços não são consideradas. O berço é considerado um ponto de atracação e os navios devem ser alocados a apenas um deles. Quando um navio pode ser atracado em qualquer posição ao longo

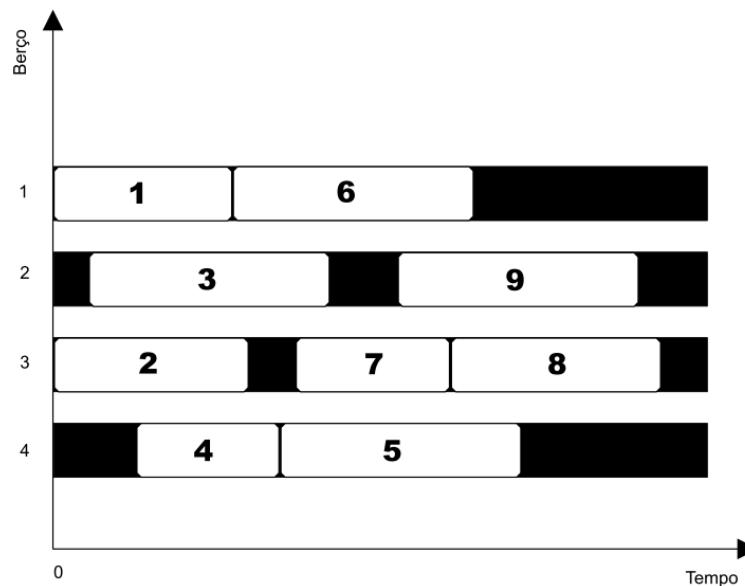


Figura 2.1 - Alocação de berços como escalonamento de máquinas

do cais, o problema pode ser tratado como um problema de corte de estoques (IMAI et al., 2005).

Variações do PAB são vistas devido à diversidade de infra-estruturas dos portos. Por isso, na tentativa de organizá-los de acordo com suas características, alguns esquemas de classificação foram propostos em (VIS; KOSTER, 2003), (STEENKEN et al., 2004) e (BIERWIRTH; MEISEL, 2010).

Seguindo o esquema de Bierwirth e Meisel (2010), quatro atributos são necessários para descrever um cenário do PAB: *espacial*, *temporal*, *tempo de tratamento* e *medida de desempenho*.

O atributo espacial refere-se a como os berços são considerados ao longo do cais. Caso sejam apenas pontos de atracação, ou seja, um navio possa ser alocado a exatamente um berço, são ditos *discretos*, como ilustrado na Figura 2.1. Os berços *contínuos* são caracterizados por terminais que utilizam toda a extensão do cais para atender os navios. Eles podem ser servidos em qualquer posição à medida que houver espaço suficiente para isso. Alguns terminais combinam os dois casos: berços discretos e contínuos, chamados *híbridos*. São compostos por berços que atendam qualquer número de navios desde que não extrapolem o seu comprimento ou por alguns berços discretos e outros contínuos. A profundidade dos berços é outro fator descritivo, no qual restringe a atracação a navios de *calado* compatível.

A questão temporal define principalmente se o horizonte de planejamento abrange apenas navios já disponíveis para serem servidos ou também navios que ainda estão para chegar. O primeiro cenário é denominado *estático* e o segundo *dinâmico*, onde este último é apenas uma generalização do anterior. Além disso, em algumas situações existe um *tempo de conclusão máximo* definido em contrato que deve ser considerado, sendo comum o ônus de multa em caso de descumprimento. Os retângulos pretos da Figura 2.1 podem expressar a ausência momentânea de navios disponíveis, por ainda não terem chegado ao porto, o que equivale ao caso dinâmico.

O tempo de tratamento é o tempo em que o navio precisa para ser servido pelo terminal. Este tempo pode ser *fixo* ou pode ser em *função da velocidade do berço e da carga do navio*. Em terminais em que há guindastes que não são dedicados a um berço, a decisão de *onde e quando os guindastes servirão*, chamado problema de alocação de guindastes (PAG), tem influência no tempo final. Ainda, em terminais de contêineres, o problema de alocá-los aos pátios pode ter influência no tempo de tratamento. Tempo adicional que não existe em terminais graneleiros, como pode ser

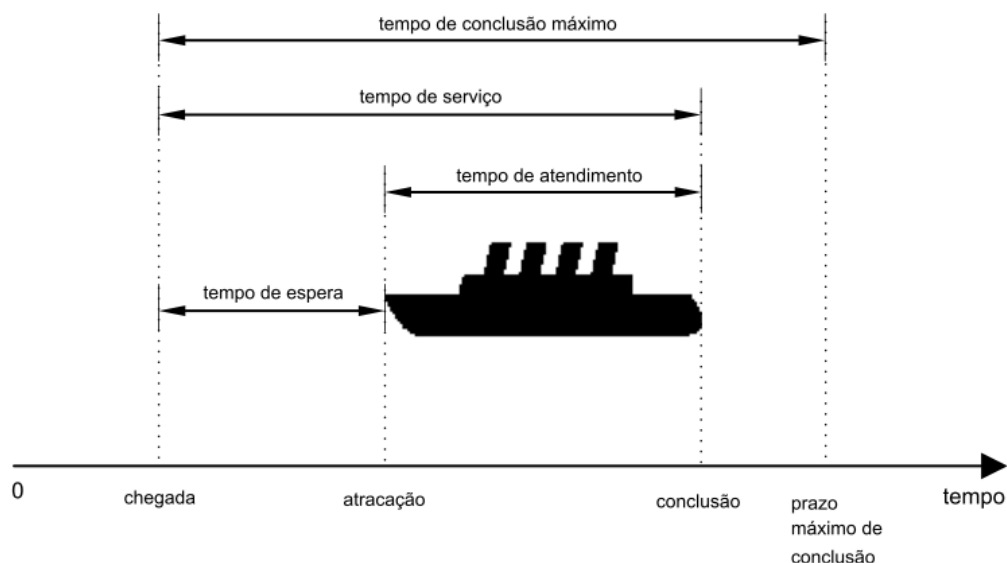


Figura 2.2 - Tempos de um navio

observado por meio da Figura 1.1.

O PAB pode ser classificado também quanto à função objetivo aplicada. Várias são as possibilidades de escolha: *tempo de espera dos navios*, *tempo de tratamento dos navios*, *tempo de conclusão dos navios*, *atraso no atendimento em relação ao tempo definido em contrato* ou mesmo a *multa* paga nesses casos, *makespan*, que é o período entre o início do atendimento do primeiro navio e o término do último, etc. Na Figura 2.2 algumas dessas medidas podem ser elucidadas.

O tempo de espera é o intervalo entre a chegada do navio e o início do seu atendimento. O tempo de atendimento, também conhecido como tempo de tratamento, é o período em que o navio permanece atracado sendo carregado ou descarregado. O tempo de serviço é a soma dos tempos de espera e de atendimento. O tempo de conclusão máximo é o período definido previamente para liberação do navio desde a sua chegada. Em algumas situações, esse prazo pode ser independente da chegada.

2.2 Revisão bibliográfica

Até meados da década de 1990, poucos trabalhos abordavam o PAB. [Thurman \(1989\)](#) foi o pioneiro quando propôs um modelo de otimização para a estação naval

Norfolk. O trabalho de Imai et al. (1997) pode ser considerado seminal no sentido de organizar o PAB em classes. O autor define o problema tratado como estático (*Static Berth Allocation Problem* - SBAP). O trabalho de Imai et al. (1997) foi também o primeiro a abordar o problema de escalonamento de máquinas na forma multi-objetiva (VIS; KOSTER, 2003). Ele objetivava a minimização dos tempos de espera e de serviço, além do desvio entre a ordem de chegada e a ordem de atendimento dos navios com o intuito de diminuir insatisfações geradas por ultrapassagens. Depois de reduzi-lo a um problema de atribuição clássico, o método húngaro foi utilizado para resolvê-lo.

Mais tarde, em (IMAI et al., 2001), é apresentada a versão dinâmica (*Dynamic Berth Allocation Problem* - DBAP) do SBAP. Um procedimento heurístico baseado na relaxação lagrangeana é utilizado para resolvê-lo. Neste caso, porém, apenas os tempos de espera e de serviço compõem o objetivo a ser minimizado. Assim como SBAP, o DBAP foi apresentado no caso discreto.

O PAB é encontrado no caso contínuo em (GUAN et al., 2002). Nele é assumido que os guindastes estão dispostos ao longo da linha do cais, podendo vários servirem um navio simultaneamente. É considerado também que um navio deve ser atendido por guindastes consecutivos. O problema é similar ao problema de empacotamento com a função objetivo sendo a minimização dos tempos de serviço.

Um modelo de programação linear inteira para o caso contínuo também foi formulado por Kim e Moon (2003). Um *solver* comercial foi capaz de derivar a solução ótima para instâncias envolvendo sete navios em um horizonte de planejamento de três dias. Uma heurística baseada no *Simulated Annealing* é proposta para resolver instâncias de dimensões reais.

Em (LORENZONI et al., 2006), foi formulado o problema de atender navios dentro de prazos acordados sob a condição do primeiro que chegar deve ser o primeiro a ser atendido. Além disso, o uso da ferramenta desenvolvida, baseada em um modelo matemático de um problema de escalonamento de recursos restritos, é indicado, além de uma extensão de um algoritmo evolutivo diferencial. Os testes computacionais com dados gerados a partir de características do ambiente portuário real também são apresentados. Os autores fazem alusão a condições de maré, que podem restringir a entrada de navios no porto em certos intervalos de tempo.

No trabalho de Xu et al. (2011), devido a grande variação das condições de maré durante um dia no cenário estudado, o calado dos navios é considerado. Em certas

condições alguns navios não podem atracar em determinados berços. O horizonte de planejamento, assim, é dividido em duas partes, uma maré baixa e uma maré alta, onde a primeira é mais restritiva. Um modelo linear inteiro misto é descrito para o problema e heurísticas são desenvolvidas para resolver o problema nos casos estático e dinâmico. Os autores observam também que dois níveis de maré por dia são apenas uma simplificação e não retratam da melhor forma a realidade.

Han et al. (2006) trata em um problema discreto restrições de calado e de comprimento do navio, que devem ser compatíveis com o berço atracado. O tempo de tratamento do navio é dependente do berço onde foi servido. A função objetivo minimiza o tempo de serviço dos navios. Os autores descrevem um modelo não-linear para o problema e o resolvem através de uma estratégia híbrida, que utiliza algoritmo genético e *simulated annealing*, denominado GASA.

Zhou et al. (2006) também leva em conta restrições físicas do berço, como calado e comprimento dos navios. Os autores apresentam um modelo de programação estocástica 0-1 para o cenário. O tempo de chegada e o tempo de tratamento dos navios são assumidos coeficientes estocásticos. A função objetivo minimiza o tempo de espera estimado dos navios. O problema é resolvido por meio de um algoritmo genético.

Park e Kim (2003) foram os primeiros a investigar o PAB integrado ao PAG. Um modelo de programação inteira foi formulado, onde foi levado em conta restrições práticas, como limiares para a quantidade de guindastes servindo um navio. Às vezes, fica definido, contratualmente, um número mínimo para servir o navio. Um procedimento de *duas fases* é sugerido para resolver o problema. A primeira fase consiste em alocar os navios aos berços e em determinar o número de guindastes atendendo cada navio, respeitando o total de guindastes disponíveis. Nesta etapa é feita uma relaxação langrangeana e o modelo resultante é resolvido pelo método do subgradiente. Na segunda fase, a partir do resultado da primeira, é tratado o escalonamento detalhado de cada guindaste. O objetivo é minimizar o número de configurações, para início de tratamento de navio, dos equipamentos. Esta etapa é abordada por meio de programação dinâmica.

Meisel e Bierwirth (2009) também investigam o PAB e PAG integrados, sendo a maior preocupação traduzir mais fielmente aspectos encontrados no mundo real. Os autores ressaltam que a redução do tempo de atendimento do navio não é necessariamente linear ao acréscimo de guindastes servindo, tendo vista a perda de produtividade por, eventualmente, alocar guindastes que não são ideais para o navio e/ou

sua carga.

Silva (2008) faz uma ampla revisão sobre operações portuárias tanto no contexto operacional quanto no econômico, comparando os cenários brasileiro e mundial. Um algoritmo genético é proposto para resolver o problema de alocação de berços no Porto de Itajaí, em Santa Catarina.

Em (MAURI et al., 2008), uma estratégia híbrida, que combina o método conhecido como *geração de colunas* e o *Algoritmo de Treinamento Populacional* (ATP), da família dos algoritmos genéticos, é proposto para resolver uma formulação do PAB para o caso discreto, apresentado em (CORDEAU et al., 2005).

O PAB é naturalmente um problema multi-objetivo (THEOFANIS et al., 2009), o que sugere a utilização combinada das medidas de desempenho. As técnicas mais utilizadas para resolver problemas multi-objetivos são oriundas dos algoritmos evolucionários, denominadas *Multi-Objective Evolutionary Algorithms* (MOEA) (DEB, 2001).

Cheong et al. (2007) abordam um problema de alocação de berços que objetiva a minimização de três medidas diferentes: *makespan*, número de ultrapassagens e tempo de espera. O autor ressalta que reduzir o *makespan* é um desejo do porto, mas é concorrente ao desejo dos navios de reduzir as ultrapassagens e o tempo de espera. Para resolver o problema foi desenvolvido um MOEA equipado com um esquema de decodificação projetado para otimizar o uso do espaço de berço, definindo exatamente a posição de atracação de cada navio no berço alocado.

(CHEONG et al., 2010) propõem um MOEA que incorpora o conceito de optimalidade de Pareto para resolver um PAB multi-objetivo com três medidas de desempenho. A função objetivo minimiza o *makespan*, o tempo de espera e desvio na ordem de atracação a partir um escala de prioridades. Este último é calculado a partir de um *grau de aderência* que mede o quão próximo uma solução está próxima da escala de prioridades. Além disso, o MOEA traz três características projetadas especificamente para os três objetivos do problema: uma heurística de busca local, um esquema híbrido de decodificação da solução e o procedimento ótimo de inserção de berços.

Alguns trabalhos consideram o PAB e PAG integrados como um problema multi-objetivo. Em (CHANG et al.,), por exemplo, a função objetivo consiste em minimizar três objetivos, sendo um deles o consumo de energia dos guindastes, tendo em vista

que quanto mais eles se deslocam ao longo do cais maior é o custo para o porto. [Liang et al. \(2011\)](#) também consideram os custos com os guindastes. Neste caso, o problema contém quatro objetivos, onde o último é a minimização do número de movimentos dos guindastes entre os berços ao longo do cais. Nos dois casos, algoritmos genéticos são propostos para resolver as formulações apresentadas.

Em ([IMAI et al., 2007](#)) é levado em conta o desejo do navio de não ter atrasos em relação ao seu tempo estimado de partida e o desejo do porto de atender todos os navios o mais rápido possível (tempo de serviço total). Para simplificação, o BAP é considerado discreto. Neste trabalho é provado que minimizar o tempo de serviço total resulta em minimizar o tempo de atraso total nas partidas dos navios quando pesos não são utilizados. Um modelo bi-objetivo foi, desta forma, formulado sem considerar ponderações entre os navios. Para a solução duas heurísticas foram desenvolvidas para resolver o problema, considerando apenas o objetivo de minimizar o tempo de serviço total. Um procedimento de otimização do subgradiente usando relaxação langrangeana encontrado em ([IMAI et al., 2001](#)) e o segundo um algoritmo genético.

Um PAB discreto e dinâmico é tratado de forma multi-objetiva em ([GOLIAS et al., 2009](#)). Os autores observam que é comum a existência de grupos de navios com exigências de atendimentos similares, seja por prioridades contratuais ou seja por restrições físicas. Esses navios são organizados em grupos, denominados *preferenciais*. Assim, é proposta uma formulação onde para cada grupo preferencial é feita a minimização dos seus tempos de serviços, além da minimização do tempo de serviço total de todos os navios. A motivação para a abordagem multi-objetiva é devido ao fato de outras abordagens comuns nestes casos apresentarem dificuldades. Restrições para exigências de atendimento, por exemplo, podem levar a muitas soluções inviáveis e atribuição de pesos, em outra abordagem, é de difícil configuração. A solução do problema é por meio de um algoritmo genético.

3 COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS

No Maranhão, existe o complexo portuário marítimo de São Luís, composto por três portos: porto do Itaqui, Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM) e o Porto da Alumar. A Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) é responsável pela administração do Porto do Itaqui, tendo como principal movimentação a importação de derivados de petróleo. A mineradora Companhia Vale do Rio Doce (Vale) opera no TMPM. A exportação de minério de ferro e pelotas, derivados do minério de ferro, é o seu principal negócio. O Porto da Alumar está associado ao Consórcio de Alumínio do Maranhão (Alumar), que produz alumínio primário e alumina, derivado do alumínio primário. Neste caso, ao contrário da Vale, é realizada tanto a exportação de seus produtos quanto a importação de matérias-primas e insumos para fabricação destes [EMAP, 2009]; [ALUMAR, 2009]; [VALE, 2008].

Uma característica marcante do complexo portuário maranhense é a presença acentuada do fenômeno conhecido como *avanço das marés*. Existe uma grande amplitude dos níveis de maré de São Luís, limitando, desta forma, a navegação dos navios nas operações de atracação ou desatracação a determinados períodos do dia. Durante um dia, existem dois períodos de maré cheia, *preamar*, e dois de maré baixa, *baixamar*. Desta forma, o ciclo de uma maré inicia-se em uma preamar e termina na seguinte, passando por uma baixamar, com duração total de, aproximadamente, 12 horas (??). Na Figura 3.1, o período de uma maré é ilustrado.

Apesar comporem uma das regiões portuárias mais profundas do mundo, os portos de São Luís sofrem com a variação dos níveis de maré. Na preamar a navegação através do canal de navegação pode ser realizada normalmente por qualquer navio,

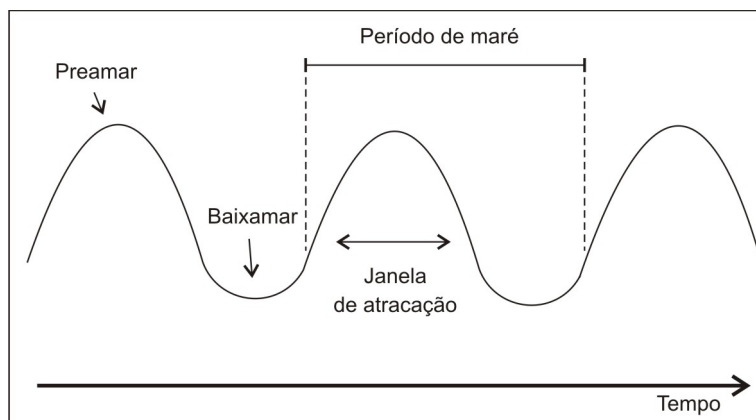


Figura 3.1 - Período de uma maré

porém, na baixamar as atracações são inviabilizadas devido a pouca profundidade, sendo, desta forma, limitadas a janelas de tempo predeterminadas.

O caso estudado neste trabalho é baseado no cenário encontrado no porto da Vale. O problema é considerado discreto e contém restrições de calado, porém, com a simplificação de todos os navios poderem atracar apenas em marés cheias. O horizonte de planejamento é, em geral, de uma a duas semanas, podendo se estender a até um mês, ou seja, trata-se do caso dinâmico. Além disso, há tempos de conclusão do atendimento de cada navio definidos contratualmente sob pena de multa (*demurrage*) para situações de sobrestadia dos navios. Após a chegada do navio, o porto tem um prazo máximo para concluir o atendimento e a multa é proporcional ao tempo extra. Os berços possuem infra-estruturas diferentes, o que torna o tempo de atendimento do navio dependente do berço atracado, mas, neste trabalho, velocidades idênticas entre os berços também é abordado.

Alguns critérios de desempenho foram identificados. O primeiro levantado foi a minimização do *demurrage* pago a todos os navios porque o custo anual da companhia devido multa é considerável.

Normalmente, o objetivo é minimizar o total dos *tempos de serviço* dos navios. A minimização do tempo de serviço de cada navio, no entanto, não necessariamente implica na minimização do tempo total de atendimento no porto. Existem situações em que precisa-se retardar o atendimento de um ou outro navio para obter-se um ganho de tempo na programação total do porto.

O tempo de atendimento de um navio varia de um berço para o outro em função da vazão que este berço provê, e o tempo de espera de um navio pelo momento e local de atracação são variáveis que interferem no tempo de serviço. O tempo de serviço é, portanto, o tempo total em que o navio fica à disposição do porto para ser liberado (soma dos tempos de espera e atendimento).

Outro objetivo também foi levantado: *demurrage*. Pode-se dizer que o *demurrage* atribui pesos ao tempo de serviço, definindo prioridades flexíveis de atracação. Apesar de não ser o primeiro critério a ser pretendido na programação do porto, é algo que pode ser investigado. Minimizar a taxa de uso do berço é um objetivo secundário, que pode ser considerado como uma penalização.

4 MODELO

Neste trabalho, dois modelos matemáticos são discutidos. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de representar o cenário encontrado no complexo portuário marítimo de São Luís. O modelo denominado neste trabalho de PGME foi apresentado em (BARROS et al., 2009) e foi acrescentado no Apêndice A. O modelo denominado PGME2 é uma nova proposta de modelagem matemática para o cenário descrito por PGME.

PGME e PGME2 referem-se ao PAB em portos graneleiros com condições favoráveis de maré e restrições de estoque, descrito no Capítulo 3. A função objetivo minimiza o tempo total de serviço dos navios.

Os portos movimentam apenas cargas em granel e, desta forma, o tempo de atendimento de cada navio é uma relação de carga do navio pela vazão do berço. As cargas diferentes possuem a mesma vazão no mesmo berço, podendo variar apenas entre os berços. Além disso, não há o problema de alocação de contêineres.

Os períodos de atracação são discretizados em janelas de tempo com condições favoráveis por causa da grande amplitude dos níveis de maré. Assim, são fornecidos pequenos intervalos para as operações de atracamento e desatracamento. Desta forma, o horizonte de planejamento é dividido em $|M|$ janelas de tempo.

Na Seção 4.1 o modelo PGME2 é apresentado. Um comparativo dos dois modelos é feito na Seção 4.2 e os resultados dos experimentos analisados na Seção 4.3.

4.1 PGME2

Os dados de entrada são:

- N : conjunto de navios;
- M : conjunto de marés;
- L : conjunto de posições de atracação (berços);
- K : conjunto de cargas operadas no porto;
- a_i : maré de chegada do navio i ;
- v_l : velocidade de carregamento do berço l ;
- e_k : nível de estoque inicial da carga k ;

- c_k : quantidade de produção da carga k ;
- h_{il} : tempo de tratamento do navio i no berço l ;
- q_{ik} : capacidade de transporte do navio i em relação a carga k .

As variáveis de decisão são dadas por y_{ijl} :

$$y_{ijl} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ atracar na maré } j \text{ no berço } l \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

A decisão é encontrar a maré j que o navio i deve atracar e começar o atendimento e determinar também em qual berço l isto ocorrerá, tendo em vista que os berços possuem vazões diferentes o que influencia no tempo de atendimento. Assim, y_{ijl} é uma variável binária onde 1 significa que houve a decisão de atracar e 0 caso contrário.

A função objetivo foi designada como a soma dos tempos de serviço dos navios. O tempo de serviço foi ilustrado por meio da Figura 2.2. A maré de chegada a_i subtraída da maré de saída do navio i no berço l , ou seja, $j + h_{il} - a_i$, resulta no tempo de serviço de cada navio. A função objetivo, desta maneira, pode ser representada por meio da Equação 4.2. O modelo matemático para o PGME2 foi formulado da seguinte forma:

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j + h_{il} - a_i) y_{ijl} \quad (4.2)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{a_i-1} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 0, \quad \forall i \in N \quad (4.3)$$

$$\sum_{j=a_i}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 1, \quad \forall i \in N \quad (4.4)$$

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{|N|} \sum_{\substack{m=j \\ m \leq |M|}}^{j+h_{il}-1} y_{nml} \leq (1 - y_{ijl})|N|, \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^{|N|} \sum_{l=1}^{|L|} \sum_{z=a_i}^j \frac{\min\{j - a_i + 1, h_{il}\}}{h_{il}} q_{ik} y_{izb} \leq j c_k + e_k, \quad \forall j \in M, b \in L, k \in K \quad (4.6)$$

A restrição 4.3 garante que a maré de chegada será respeitada e nenhum navio atracará antes. A restrição 4.4, por sua vez, exige que todo navio seja atracado após sua respectiva maré de chegada.

A Equação 4.5 evita que um navio seja atracado a um berço antes que o navio anterior tenha saído, ou seja, evita a sobreposição de navios. Para isso, a cada atracação de um navio i na maré j e no berço l , $y_{ijl} = 1$, é anulada a atracação de qualquer navio n , $\forall n \neq i$, até a maré de desatracação de i , que pode ser obtida da seguinte forma $j + h_{il} - 1$.

A Equação 4.6 refere-se ao controle de estoque. Em cada maré j e para cada carga k é restringida a quantidade de carga carregada em todos os navios a apenas o que já foi produzido somado ainda ao estoque inicial. Ou seja, os navios não podem ser abastecidos com mais carga do que já foi produzida pela fábrica ou porto. O que já foi produzido da carga k até a maré j somado ao estoque inicial e_k pode ser obtido assim: $j c_k + e_k$. A quantidade *consumida* por cada navio i até esta maré j , por sua vez, pode ser obtida da seguinte forma:

$$\frac{j - a_i + 1}{h_{il}} q_{ik} \quad (4.7)$$

Na Equação 4.6 a função *min* serve apenas para manter o *consumo* máximo do navio i , q_{ik} , quando j refere-se a uma maré após sua desatracação. Caso não houvesse esta condição, o navio i poderia consumir mais do que sua capacidade q_{ik} de transporte, quando $j > a_i + h_{il}$, o que seria uma situação indesejada ou mesmo impossível.

4.2 PGME x PGME2

PGME2 é uma nova abordagem ao problema descrito no Capítulo 3, uma alternativa ao modelo PGME, que, para algumas instâncias, pode tornar a derivação de soluções

muito dispendiosa.

Esta abordagem é desenvolvida a partir da mudança nas variáveis de decisão. No modelo anterior, existe três conjuntos de variáveis: x_{ij} , u_{il} e y_{ijl} . O primeiro conjunto representa a decisão do navio i atracar na maré j e o segundo a decisão do navio i atracar no berço l , respectivamente, sendo, desta forma, variáveis binárias. O conjunto de variáveis y_{ijl} foi incorporado ao modelo anterior junto com as restrições A.10-A.12 com o intuito de poder relacionar x_{ij} e u_{il} sem a necessidade torná-lo não-linear.

No PGME2, existe apenas um conjunto de variáveis, y_{ijl} , que são binárias e representam a decisão de navio i atracar na maré j e no berço l . Outra diferença é que x_{ij} refere-se a quais marés o navio i permanece atracado, podendo ser mais de um. Por sua vez, y_{ijl} indica apenas o momento da primeira maré de atendimento do navio i , ou maré de atracação.

Desta forma, o novo modelo apresenta $|N| \times |M| \times |L|$ variáveis e foram necessárias apenas $(2|N|) + (|N| \times |M| \times |L|) + (|K| \times |M| \times |L|)$ restrições para descrevê-lo. No modelo anterior, são utilizados $(|N| \times |M|) + (|N| \times |L|) + (|N| \times |M| \times |L|)$ variáveis e $(3|N|) + (|M| \times |L|) + (|N| \times |M|) + (|K| \times |M|) + (3|N| \times |M| \times |L|)$ restrições. Esta diferença sugere tempos de processamento menores para o PGME2, principalmente para instâncias maiores.

4.3 Experimentos computacionais

Todos os experimentos foram realizados em um computador com processador *Core i5* e com 4 GB de memória RAM. As soluções foram derivadas por meio do *solver* IBM ILOG CPLEX versão 12.2, no sistema operacional *Microsoft Windows 7*.

Os experimentos foram conduzidos com o objetivo de validar o novo modelo, comparando seus resultados com os resultados do modelo anterior, assim como fazer uma análise de desempenho entre eles. Desta forma, um conjunto de instâncias foi gerado com o intuito de testar a influência de algumas restrições do modelo. Este conjunto consiste de 12 instâncias aplicadas aos dois modelos.

Uma dificuldade encontrada para esta abordagem é estimar a quantidade de marés que devem ser utilizadas, tendo em vista que a quantidade exata necessária é desconhecida *a priori*. Quanto menor, mais fácil será a resolução do problema, porém existe a possibilidade de gerar instâncias sem solução devido a falta de tempo para todos os navios atracarem. No caso de importação e, conseqüente, consumo de

produtos por parte da fábrica, o excesso de marés além de tornar o problema mais difícil de ser resolvido, pode resultar em soluções inviáveis também. Como o estoque é consumido regularmente pela fábrica, a tendência é que no decorrer do tempo ele seja esgotado se não houver navios atracando.

Na Tabela 4.3, é relacionado o conjunto de instâncias geradas com suas respectivas soluções derivadas pelo CPLEX. Ela é composta pelo número da instância, número de navios, quantidade de marés estimadas, número de berços considerados e os respectivos tempos de execução e custos dos modelos apresentados.

#	N	M	L	Tempo (s)		Custo	
				PGME	PGME2	PGME	PGME2
1	10	15	4	0,77	0,25	29	29
2	10	20	3	1,10	0,4	44	44
3	10	25	2	3,4	0,44	43	43
4	15	30	4	935,46	1,8	77	77
5	15	35	3	816,89	2,65	86	86
6	15	40	2	919,2	4,57	121	121
7	20	40	4	3600,0	4,01	114 (36, 61%)	108
8	20	40	3	3600,0	4,19	108 (40, 96%)	107
9	20	55	2	3600,0	20,26	-	287
10	30	70	4	3600,0	25,65	211 (63, 13%)	185
11	30	75	3	3600,0	31,2	-	190
12	30	80	2	3600,0	3600,0	-	600 (3, 5%)

Tabela 4.1 - Comparação dos resultados para os 2 modelos

As instâncias foram elaboradas em 4 partes de 3 instâncias com 10, 15, 20 e 30 navios. Para cada parte, variou-se o número de berços de 2 a 4, na sequência, as quantidades de marés foram estimadas. Os outros parâmetros do modelo foram gerados de forma *semi-aleatória*, havendo o cuidado de não gerar instâncias sem solução.

Foi estabelecido o limite de 3600 segundos para o tempo máximo de execução do *solver* na derivação das soluções. Com o novo modelo, a instância 12 excedeu o tempo limite de 3600, porém obteve um *gap* de 3,5% apenas para a solução ótima. Todas as outras instâncias foram resolvidas otimamente pelo novo modelo.

No modelo anterior, todas as execuções das instâncias com 20 e 30 excederam o tempo limite, sendo que para as instâncias 9, 11 e 12 sequer foi encontrado alguma solução viável. Foram encontradas soluções não-ótimas para instâncias 7, 8 e 10, mas

com *gap* alto.

As instâncias de 15 navios resultaram em diferenças consideráveis nos tempos de processamento. O PGME derivou todas as soluções ótimas, mas com tempos de processamento muito altos se comparados aos tempos do PGME2. Em média, o PGME exigiu 890,51 segundos enquanto o novo modelo não precisou mais do que 3,00 segundos para solucionar estas instâncias.

As instâncias de 10 navios foram resolvidas rapidamente com os dois modelos. O maior tempo exigido foi de 3,4 segundos para PGME. Entretanto, ainda assim, o PGME2 obteve tempos consideravelmente menores, onde o tempo médio demandado pelo PGME2 equivale 20,5% do tempo médio do PGME.

Pode ser percebido também que o novo modelo variou seu tempo de execução à medida que o número de marés foi aumentada. Isto reafirma a limitação desta modelagem quanto ao valor estimado para o número de marés, levando em conta que marés a mais podem ocorrer, o que torna o problema mais "difícil" de ser resolvido.

5 CLUSTERING SEARCH

O *Clustering Search* (CS), apresentado por (CHAVES, 2009), é uma generalização da metaheurística *Evolutionary Clustering Search* (ECS), desenvolvida por (OLIVEIRA, 2004). A concepção do ECS surgiu do fato de que vasculhar todo o espaço de busca a procura da melhor solução geralmente é uma tarefa árdua do ponto de vista computacional à medida que as dimensões do problema estudado crescem. No ECS é proposta a identificação de regiões supostamente promissoras para uma busca mais eficaz. Estas regiões são definidas por estruturas abstratas denominadas *clusters*, que têm o papel de agrupar conjuntos de soluções vizinhas. Em uma perspectiva evolucionária, vários indivíduos semelhantes representam um sinal de abundância de recursos em seu *habitat*. Isto equivale a soluções vizinhas geradas em uma determinada localidade do espaço de buscas. Consequentemente, conclui-se que um *cluster* com várias soluções sinaliza uma possível região promissora, o que a torna passível de uma investigação mais refinada. Desta forma, o ECS permite a utilização de otimizadores *poderosos* como os buscadores locais, que geralmente exigem o esforço computacional maior, aplicados apenas em regiões previamente selecionadas.

Este tipo de abordagem híbrida, combinando agrupadores de soluções com buscadores locais, vem sendo muito utilizada recentemente (CHAVES, 2009). Ela procura tirar proveito da boa qualidade das soluções obtidas pelos buscadores locais sem prejudicar o tempo de execução total. Para atingir este objetivo, as regiões que sinalizam um potencial para busca local, ou seja, sugerem a presença de *poços de atração* são as investigadas.

No *Clustering Search* é apresentada uma generalização do ECS, onde o método é desvinculado da abordagem evolutiva, podendo, desta forma, ser aplicado com outras heurísticas. A abordagem evolutiva do ECS está ligada, mais precisamente, à forma como as soluções são geradas para posteriormente serem agrupadas. Entretanto, (CHAVES, 2009) constatou que outras técnicas podem ser empregadas para este propósito sem reduzir a qualidade das soluções geradas. Além da generalização em si, o fato do arcabouço evolutivo conduzir a algoritmos que demandam maior processamento sugere a utilização de heurísticas mais *leves*.

Assim como o ECS, o CS objetiva localizar as regiões promissoras e agrupar suas soluções em *clusters*. Cada *cluster* C é definido por três atributos $C = (c, v, r)$, sendo c_i o centro do *cluster* C_i , v_i o volume ou a quantidade de soluções pertencentes a C_i e r_i o índice de ineficácia, que indica a quantidade de vezes que o C_i foi investigado sem haver melhora na solução. Este índice é utilizado para identificar quando C_i

não é uma boa região ou mesmo que a região já foi explorada o suficiente. Para tal, toma-se um limitante r_{max} , que sinaliza quando esta situação ocorre.

Três componentes principais resumem o CS: uma heurística, um processo de agrupamento e um buscador local. A heurística é responsável por gerar as soluções que serão agrupadas. O processo de agrupamento é responsável por agrupar cada solução gerada ao *cluster* mais próximo, de acordo com alguma medida de distância. O papel do buscador local é encontrar uma melhor solução vizinha ao centro do *cluster* agrupador à medida que este for identificado como promissor.

Tendo em vista que o processo de geração de soluções tem por objetivo a diversificação das soluções, a heurística deve cobrir o máximo possível o espaço de soluções. (CHAVES, 2009) propõe o uso de metaheurísticas para atingir este objetivo.

A cada iteração, a solução gerada deve ser incorporada a um *cluster* mais próximo. A partir daí, tem-se um processo denominado de *assimilação* onde o centro é atualizado considerando informações da solução agrupada. Algumas formas de assimilação são propostas por (OLIVEIRA, 2004):

Simples : um percentual de informação da solução gerada é incluído no centro;

Por recombinação : um cruzamento entre o centro e a solução gerada resulta em outra solução, que representará o centro; e,

Por caminho : um caminho é gerado entre a solução gerada e o centro, onde a melhor solução do caminho representará o novo centro.

Em seguida, é realizada uma análise do *cluster* C_i para identificar se este pode ser considerado promissor. Para isto, verifica-se seu volume v_i atinge o limitante λ e, também, se a busca local obteve sucesso recentemente neste *cluster*, ou seja, se $v_i \geq \lambda$ e $r_i < r_{max}$. A busca local obtém sucesso quando a solução encontrada é melhor que a atual melhor solução do *cluster*. Caso $v_i \geq \lambda$ e $r_i \geq r_{max}$, C_i já foi suficientemente explorado e é gerada uma perturbação no seu centro com intuito de outras áreas serem pesquisadas. Isto se torna necessário devido ao fato de CS utilizar um número fixo de *clusters*.

6 PROPOSTA DE TESE

Neste Capítulo são apresentados as investigações iniciais para o PAB descrito no Capítulo 3 em cenários multiobjetivos. O modelo PGME2, apresentado na Seção ??, é alterado para incluir outras funções objetivo. Além disso, pretende-se investigar a utilização do *Clustering Search* na resolução de problemas multiobjetivos. Após apresentação dos resultados preliminares, são discutidas as propostas de trabalhos futuros.

6.1 Modelo Multiobjetivo

Em prosseguimento ao cenário levantado no Capítulo 3 e descrito por meio do modelo PGME2, foi realizada a modificação do PAB mono-objetivo para o caso do PAB multiobjetivo. Como já foi dito, o PAB é naturalmente um problema multiobjetivo porque envolve interesses da administração do porto e do navio, que geralmente são conflitantes. Basicamente, os navios querem ser atendidos o mais rápido possível, seguindo a ordem de chegada, e o porto quer redefinir a ordem de atracação em relação à ordem de chegada dos navios, seguindo critérios financeiros, operacionais ou mesmo políticos.

Vários objetivos podem ser identificados para o PAB, todavia, nesta etapa do trabalho, apenas três critérios são considerados: tempo de serviço dos navios, *demurrage* e número de ultrapassagens entre os navios. O objetivo é a minimização destas três medidas.

A expressão para minimizar o tempo de serviço dos navios já foi apresentada por meio da Equação 4.2. Portanto, apenas as expressões para minimização do *demurrage* e do número de ultrapassagens são apresentadas a seguir.

6.1.1 Demurrage

Para abordar o PAB com o *demurrage* como critério de desempenho é necessário, obviamente, inserir à estrutura das instâncias informações apropriadas. Como o *demurrage* significa uma multa por atraso, devem ser considerados o *tempo de conclusão máximo* (ver Figura 2.2) e o valor de multa por maré de sobrestadia, sendo a multa total proporcional a este período a mais. Desta forma, os dados adicionais utilizados são:

- t_i : tempo de conclusão máximo do navio i ;

- d_i : valor de multa aplicada ao porto por maré de sobrestadia do navio i .

A maré de conclusão do navio i pode ser obtida por meio da soma da maré de atracação j pelo seu tempo de atendimento, h_{il} , no berço l , como na expressão

$$j + h_{il} - 1$$

O tempo de sobrestadia é, então, definido como

$$\text{sobrestadia}_i = j + h_{il} - 1 - t_i$$

Assim, multiplicando este resultado por $d_i y_{ijl}$, obtém-se a função objetivo, na Equação 6.1, que minimiza o valor total de *demurrage* pago.

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=t_i-h_{il}+2}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j + h_{il} - 1 - t_i) d_i y_{ijl} \quad (6.1)$$

Subtraindo o tempo de atendimento h_{il} do navio i de seu prazo de conclusão máximo t_i mais 1 obtém-se a última maré para atracação que não leva a *demurrage*. Somente as atracações a partir da maré $t_i - h_{il} + 2$ resultam em sobrestadia e, consequentemente, *demurrage*. Por isto, o índice j na função objetivo é iniciado nesta maré.

6.1.2 Ultrapassagens

Ultrapassagens não são sempre “bem-vindas” pelos navios, mas este artifício é frequentemente utilizado pelos portos para satisfazer critérios de desempenho ou restrições operacionais adotados. Minimizar o número de ultrapassagens, além de reduzir a insatisfação dos navios, reduz a possibilidade de um navio com baixa prioridade ter sua atracação postergada um grande número de vezes. Evidentemente, este critério deve ser usado em uma abordagem multiobjetiva, onde a sua influência se torna mais expressiva. Caso contrário, as soluções seriam iguais ou semelhantes aos tempos de chegada, onde as ultrapassagens ocorrem apenas para satisfazer restrições.

Ao contrário da função objetivo de minimização do *demurrage*, para a minimização do número de ultrapassagens não é necessário a inserção de dados complementares. A informação da maré de chegada, a_i , é suficiente para determinar o número de ultrapassagens. Todavia, não foram identificados coeficientes que representem dire-

tamente ultrapassagens entre navios. E, para realizar esta função objetivo, uma nova variável, assim como um novo conjunto de restrições, são adicionados ao modelo.

A variável definida como v_{in} é uma variável binária que representa a existência ou não de ultrapassagem entre os navios i e n , como segue:

$$v_{in} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ é ultrapassado pelo navio } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.2)$$

Para isto, a restrição 6.3 determina o valor da variável v_{in} , atribuindo 1 quando, após a maré de atracação do navio i , não há a atracação do navio n .

$$\sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} - \sum_{m=j}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{nml} \leq v_{in}, \quad \forall i \in N, n(n \neq i) \in N, j \in L \quad (6.3)$$

Assim, associado à restrição 6.3, a função objetivo que minimiza o número de ultrapassagens foi definida como:

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{n=1}^{|N|} v_{in} \quad (6.4)$$

Dentro do modelo matemático, as três funções objetivos são utilizadas por meio do método da soma ponderada, onde o problema multiobjetivo torna-se um problema mono-objetivo, além da inclusão da restrição apresentada na Equação 6.3. Os pesos w_1 , w_2 e w_3 são constantes reais que complementam o método e devem ser ajustados para atribuir o nível de importância para cada objetivo.

Desta forma, o modelo matemático PGME2 é alterado, resultando no modelo denominado PGME2MO ou PGME2 Multiobjetivo. A função objetivo em 6.5 e as equações 6.6-6.10 definem o PGME2MO.

$$\min w_1 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j+h_{il}-a_i)y_{ijl} + w_2 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=t_i-h_{il}+2}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j+h_{il}-1-t_i)d_i y_{ijl} + w_3 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{n=1}^{|N|} v_{in} \quad (6.5)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{a_i-1} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 0, \quad \forall i \in N \quad (6.6)$$

$$\sum_{j=a_i}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 1, \quad \forall i \in N \quad (6.7)$$

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{|N|} \sum_{\substack{m=j \\ m \leq |M|}}^{j+h_{il}-1} y_{nml} \leq (1 - y_{ijl})|N|, \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (6.8)$$

$$\sum_{i=1}^{|N|} \sum_{l=1}^{|L|} \sum_{z=a_i}^j \frac{\min\{j - a_i + 1, h_{il}\}}{h_{il}} q_{ik} y_{izb} \leq j c_k + e_k, \quad \forall j \in M, b \in L, k \in K \quad (6.9)$$

$$\sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} - \sum_{m=j}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{nml} \leq v_{in}, \quad \forall i \in N, n(n \neq i) \in N, j \in L \quad (6.10)$$

6.1.3 Proposta para PAB multiobjetivo

Como proposta para o PAB multiobjetivo serão investigados novos critérios de desempenho a fim de contemplar o máximo possível o cenário real descrito. Além disso, pretende-se aprimorar o modelo com novas técnicas de modelagem com o intuito de reduzir os tempos de processamento nas derivações das soluções.

6.2 CS multiobjetivo

Um novo esquema adaptado do esquema original do *Clustering Search* é proposto também neste trabalho. Este esquema trabalha com a hipótese do CS poder ser adaptado para problemas multiobjetivos, gerando para cada problema uma boa fronteira de pareto.

Nas seções a seguir tem-se um esboço do que pode ser feito para “mapear” o CS original em CS multiobjetivo. Deve ficar claro que este mapeamento deve ser obtido adaptando o conceito de regiões promissoras. Mais precisamente, região promissora no CS multiobjetivo deve representar região que pode gerar novas soluções não-dominadas.

6.2.1 Geração de Clusters

No esquema original do CS, os *clusters* iniciais são gerados por aleatoriamente. Algumas abordagens, entretanto, utilizam heurísticas, que buscam boa diversidade para os centros e, conseqüentemente, boa cobertura do espaço de soluções.

Nesta proposta multiobjetiva, a geração de *clusters* é feita de forma *progressiva*. Não há um conjunto de *clusters* iniciais. Para cada nova solução selecionada (gerada) é feita a avaliação se esta é não-dominada. Em caso afirmativo, esta nova solução torna-se um novo centro para um novo *cluster*. Caso seja dominada, a solução é agrupada ao centro mais próximo.

O objetivo deste esquema é ter como frente de pareto o conjunto de todos os centros de *clusters* gerados até o momento. Desta forma, qualquer melhoramento em um centro pode significar a eliminação de outros *clusters*. Como consequência deste esquema, pretende-se obter uma frente de pareto com soluções de qualidade, haja visto que as buscas locais serão realizadas apenas em pontos da frente.

6.2.2 Heurística

A heurística para seleção (geração) das soluções pode ser as mesmas empregadas nas abordagens mono-objetivas. Algoritmos como *Simulated Annealing* poderiam ser usados. O ponto fundamental é conseguir soluções que mantenham a diversidade, considerando que, no CS, os buscadores locais provêm a profundidade.

Um questão a ser explorada é a utilização de algoritmos evolutivos. Representaria uma alternativa às abordagens que evoluem as fronteiras de pareto. Nesta caso, todo ponto dominado que é descartado do agrupador, deve ser ainda sim mantido na metaheurística.

6.2.3 Agrupamento

O agrupamento no CS multiobjetivo tem o mesmo papel que no CS original: identificar regiões promissoras. Entretanto, estas regiões promissoras na abordagem multi-objetiva pode ter outro significado. Mais precisamente, pretende-se considerar regiões que podem gerar soluções não-dominadas como as regiões promissoras. Como resultado disto, espera-se gerar um conjunto maior de soluções pertencentes à fronteira de pareto.

Realizar isto depende basicamente de identificar medidas de distância que estejam

ligadas a relação de dominância entre soluções. Distância euclidiana, ou distância de *hamming* não são aplicadas diretamente, como no esquema original do CS, porém podem ser adaptadas para esta nova proposta.

6.2.4 Buscador Local

O esquema de busca local é idêntico ao esquema original. Assim que o *cluster* é considerado promissor, uma heurística de busca local deve ser executada.

7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Etapa 1 Cumprimento dos créditos, em disciplinas regulares, exigidos no programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do INPE;

Etapa 2 Desenvolvimento e Defesa da Qualificação;

Etapa 3 Estudo sobre otimização multiobjetiva e aplicações no PAB;

Etapa 4 Desenvolvimento e Defesa da Proposta de Tese;

Etapa 5 Investigação da abordagem Multiobjetiva proposta para o heurística Clustering Search;

Etapa 6 Estudo em otimização estocástica e aplicações no PAB;

Etapa 7 Estudo de outros problemas e metaheurísticas;

Etapa 8 Análise de resultados finais e elaboração da tese de doutorado;

Etapa 9 Defesa da tese de doutorado.

Tabela 7.1 - Atividades de 2010

Ano	2010											
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1							x	x	x	x	x	x
Etapa 2												
Etapa 3												
Etapa 4												
Etapa 5												
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8												
Etapa 9												

Tabela 7.2 - Atividades de 2011

Ano	2011											
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1	x	x	x	x	x	x						
Etapa 2						x	x	x	x			
Etapa 3												
Etapa 4										x	x	x
Etapa 5												
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8												
Etapa 9												

Tabela 7.3 - Atividades de 2012

Ano	2012											
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1												
Etapa 2												
Etapa 3	x	x	x	x	x							
Etapa 4	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Etapa 5				x	x	x	x	x	x	x	x	x
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8												
Etapa 9												

Tabela 7.4 - Atividades de 2013

Ano	2013											
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1												
Etapa 2												
Etapa 3												
Etapa 4												
Etapa 5												
Etapa 6				x	x	x	x	x	x			
Etapa 7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Etapa 8							x	x	x	x	x	x
Etapa 9												

Tabela 7.5 - Atividades de 2014

Ano	2014											
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1												
Etapa 2												
Etapa 3												
Etapa 4												
Etapa 5												
Etapa 6												
Etapa 7												
Etapa 8	x	x	x	x	x							
Etapa 9						x						

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta proposta de tese tem por objetivo investigar o problema de alocação de berços, estendendo a cenários multiobjetivos. Desta forma, espera-se contribuir com desenvolvimento destas operações portuárias, tendo como alvo a busca por otimização dos recursos necessários.

Na primeira parte do trabalho, foi apresentada a nova formulação matemática para o PAB em um cenário descrito baseado no complexo portuário de São Luís-MA. Os experimentos foram comparados com os experimentos em um modelo anterior. Nos resultados ficou claro que a nova abordagem conseguiu um tempo de processamento bem melhor. A redução no número de variáveis necessárias e, consequentemente, no número de restrições foi fator predominante para esta melhoria.

Como extensão ao novo modelo proposto, uma abordagem multiobjetiva gerou um modelo matemático com três funções objetivo: minimização do tempo de serviço, do demurrage e das ultrapassagens. Como proposta, novos critérios de desempenho devem ser explorados, como, por exemplo: a minimização do *makespan*.

A motivação para a abordagem multiobjetiva deve-se ao fato do PAB ser naturalmente um problema multiobjetivo. A partir desta premissa, foi apresentada a hipótese do Clustering Search ser capaz de gerar boas soluções em problemas multiobjetivos. Foi apresentado um esboço do mapeamento pretendido de CS para CS multiobjetivo. Como proposta, pretende-se investigar se um "bom" conjunto de pareto é gerado para o problema com o CS multiobjetivo.

Além disso, pretende-se explorar outros métodos e ferramentas que possam ser aplicados ao PAB, principalmente considerando questões de multiobjetivo, como, por exemplo, otimização estocástica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AK, A. Berth and quay crane scheduling: problems, models and solution methods. Georgia Institute of Technology, 2008. 3
- BARROS, V.; COSTA, T.; OLIVEIRA, A.; LORENA, L. Problema de alocação de berços heterogêneos em portos graneleiros com restrições de estoque e condições favoráveis de maré. In: **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 16. 13
- BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 202, n. 3, p. 615–627, 2010. 1, 4
- BRUCKER, P. **Scheduling algorithms**. [S.l.]: Springer Verlag, 2007. 3
- BUHRKAL, K.; ZUGLIAN, S.; ROPKE, S.; LARSEN, J.; LUSBY, R. Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier, 2011. 1
- CHANG, D.; HE, J.; ZHANG, H. A rule-based joint berth allocation and quay crane assignment. In: IEEE. **Industrial and Information Systems (IIS), 2010 2nd International Conference on**. [S.l.]. v. 1, p. 464–467. 8
- CHAVES, A. **Meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Computação Aplicada)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. 19, 20
- CHEONG, C.; LIN, C.; TAN, K.; LIU, D. A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port. In: IEEE. **Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on**. [S.l.], 2007. p. 927–934. 8
- CHEONG, C.; TAN, K.; LIU, D.; LIN, C. Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports. **Annals of Operations Research**, Springer, p. 1–41, 2010. 8
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; LEGATO, P.; MOCCIA, L. Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. **Transportation Science**, v. 39, p. 526–538, 2005. 3, 8

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. [S.l.]: Wiley, 2001. 8

GOLIAS, M.; BOILE, M.; THEOFANIS, S. Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier, v. 45, n. 6, p. 878–892, 2009. 9

GUAN, Y.; XIAO, W.; CHEUNG, R.; LI, C. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis. **Operations Research Letters**, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 343–350, 2002. 6

HAN, M.; LI, P.; SUN, J. The algorithm for berth scheduling problem by the hybrid optimization strategy gasa. In: IEEE. **Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference on**. [S.l.], 2006. p. 1–4. 7

IMAI, A.; NAGAIWA, K.; TAT, C. Efficient planning of berth allocation for container terminals in asia. **Journal of Advanced Transportation**, Wiley Online Library, v. 31, n. 1, p. 75–94, 1997. 6

IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 401–417, 2001. 3, 6, 9

IMAI, A.; SUN, X.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 199–221, 2005. 4

IMAI, A.; ZHANG, J.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The berth allocation problem with service time and delay time objectives. **Maritime Economics & Logistics**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 4, p. 269–290, 2007. 9

KIM, K.; MOON, K. Berth scheduling by simulated annealing. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 37, n. 6, p. 541–560, 2003. 6

LI, C.; PANG, K. An integrated model for ship routing and berth allocation. **International Journal of Shipping and Transport Logistics**, Inderscience, v. 3, n. 3, p. 245–260, 2011. 3

LIANG, C.; GUO, J.; YANG, Y. Multi-objective hybrid genetic algorithm for quay crane dynamic assignment in berth allocation planning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, p. 1–9, 2011. 9

LORENZONI, L.; AHONEN, H.; ALVARENGA, A. A multi-mode resource-constrained berth allocation problem for a container port, author=Imai, A. and Nishimura, E. and Papadimitriou, S., journal=Transportation Research Part B: Methodological, volume=35, number=4, pages=401–417, year=2001, publisher=Elsevier. **Aimed scheduling problem in the context of port operations. Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 50, n. 1-2, p. 55–65, 2006. 6

MAURI, G.; OLIVEIRA, A.; LORENA, L. A hybrid column generation approach for the berth allocation problem. **Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization**, Springer, p. 110–122, 2008. 8

MEISEL, F.; BIERWIRTH, C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 196–209, 2009. 7

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. 2011. Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/mapas/mapclick/portos/jporto.htm>>. Acesso em: 30 de junho 2011. 1

OLIVEIRA, A. Algoritmos evolutivos híbridos com detecção de regiões promissoras em espaços de busca contínuos e discretos. **Algoritmos evolutivos híbridos com detecção de regiões promissoras em espaços de busca contínuos e discretos**, 2004. 19, 20

PARK, Y.; KIM, K. A scheduling method for berth and quay cranes. **OR Spectrum**, Springer, v. 25, n. 1, p. 1–23, 2003. 7

PINEDO, M. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. [S.l.]: Springer Verlag, 2008. 3

SILVA, V. **Um modelo heurístico para alocação de navios em berços**. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. 1, 8

STEENKEN, D.; VOSS, S.; STAHLBOCK, R. Container terminal operation and operations research-a classification and literature review. **OR spectrum**, Springer, v. 26, n. 1, p. 3–49, 2004. 4

THEOFANIS, S.; BOILE, M.; GOLIAS, M. Container terminal berth planning. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Trans Res Board, v. 2100, n. -1, p. 22–28, 2009. 8

THURMAN, K. **Optimal ship berthing plans**. [S.l.: s.n.], 1989. 5

VIS, I.; KOSTER, R. D. Transshipment of containers at a container terminal: An overview. **European Journal of operational research**, Elsevier, v. 147, n. 1, p. 1–16, 2003. 4, 6

XU, D.; LI, C.; LEUNG, J. Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, 2011. 6

ZHOU, P.; KANG, H.; LIN, L. A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration. In: IEEE. **Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on**. [S.l.], 2006. v. 2, p. 7297–7301. 7

APÊNDICE A - PGME

Os dados de entrada são:

- N : conjunto de navios;
- M : conjunto de marés;
- L : conjunto de posições de atracação (berços);
- K : conjunto de cargas operadas no porto;
- a_i : maré de chegada do navio i ;
- v_l : velocidade de carregamento do berço l ;
- e_k : nível de estoque inicial da carga k ;
- c_k : quantidade de produção da carga k ;
- h_{il} : tempo de tratamento do navio i no berço l ;
- q_{ik} : capacidade de transporte do navio i em relação a carga k .

As variáveis de decisão são dadas por x_{ij} , u_{il} e y_{ijl} :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ estiver alocado à maré } j \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$u_{il} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ estiver alocado ao berço } l \\ 0 & \text{de outra forma} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

y_{ijl} é uma variável auxiliar real, que compõe uma técnica de linearização para a associação não-linear de x_{ij} e u_{il} . O modelo matemático para o PGME foi formulado assim:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=a_i}^M \sum_{l=1}^L \left\lceil \frac{j - a_i + 1}{h_{il}} \right\rceil \times y_{ijl} \quad (\text{A.3})$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{a_i-1} x_{ij} = 0, \quad \forall i \in N \quad (\text{A.4})$$

$$\sum_{j=a_i}^M x_{ij} = \sum_{l=1}^L h_{il} \times u_{il}, \quad \forall i \in N \quad (\text{A.5})$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ijl} \leq 1, \quad \forall j \in M, l \in L \quad (\text{A.6})$$

$$\sum_{l=1}^L u_{il} = 1, \quad \forall i \in N \quad (\text{A.7})$$

$$\sum_{z=1}^{j-1} x_{iz} - j \times x_{ij-1} + j \times x_{ij} \leq j, \quad \forall i \in N, j > a_i \in M \quad (\text{A.8})$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^j \sum_{l=1}^L \frac{q_{ik}}{h_{il}} \times y_{izl} \geq j \times w_k - e_k, \quad \forall j \in M, k \in K \quad (\text{A.9})$$

$$y_{ijl} \geq x_{ij} + u_{il} - 1 \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (\text{A.10})$$

$$y_{ijl} \leq x_{ij} \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (\text{A.11})$$

$$y_{ijl} \leq u_{il} \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (\text{A.12})$$