

4

Descrição do modelo matemático proposto

O modelo matemático de programação linear inteiro misto (PLIM) proposto neste capítulo foi baseado no modelo apresentado por Steffensen (2012). Após algumas adaptações, ele apresentou-se aderente ao problema de dimensionamento da frota de navios de derivados claros da PETROBRAS. No item 4.1 é realizada uma breve descrição deste modelo original. No item 4.2, as simplificações que se fizeram necessárias para a execução do modelo são detalhadas. Por fim, o item 4.3 apresenta a nomenclatura utilizada e o modelo proposto.

4.1

Descrição do modelo original

O problema estudado por Steffensen (2012) refere-se a uma companhia de navegação do segmento *Roll on-Roll off* (Ro-Ro) sediada em Oslo, Noruega. O principal objetivo do autor é verificar a precisão de um modelo matemático de otimização do dimensionamento da frota desenvolvido pela *Norwegian Marine Technology Research Institute* (MARINTEK). Para isso, é proposto um novo modelo para alocar a frota dimensionada às rotas comerciais atendidas pela empresa. Além disso, o autor realiza alguns testes variando o horizonte de planejamento, o custo dos combustíveis marítimos e utilizando variáveis contínuas ao invés de variáveis inteiras. A principal conclusão foi que o modelo de dimensionamento da frota é mais aderente para um horizonte de planejamento de curto prazo.

O modelo matemático desenvolvido pela MARINTEK, e validado pelo trabalho de Steffensen (2012), foi escolhido como modelo base para esta dissertação. Por se tratar de um modelo desenhado para uma empresa que opera seus navios no modo *liner shipping*, algumas adaptações se fizeram necessárias para torná-lo aderente ao problema da PETROBRAS, que se enquadra no modelo de operação *industrial shipping*. Restrições referentes à capacidade de produto por tipo de navio e à frequência de navios nos portos foram eliminadas, enquanto que restrições referentes a calado, suprimento e demanda foram introduzidas.

4.2 Simplificações realizadas no modelo

O problema real de programação de navios está inserido em um ambiente carregado de incertezas, como variações da demanda, problemas operacionais em refinarias, navios, dutos e terminais, preço futuro dos combustíveis, entre outros. Como o modelo aqui proposto pretende resolver um problema de transporte para o curto prazo, alguns aspectos da realidade foram simplificados. A importância em simplificar o modelo foi defendida por Fagerholt (2004), que após inúmeras iniciativas junto a companhias de navegação, percebeu que existe uma resistência e ceticismo junto aos programadores em relação aos modelos matemáticos para otimização da frota.

A intenção do modelo apresentado nesta dissertação é que os seus resultados sirvam como uma indicação do tamanho da frota ideal, que deve ser avaliada criteriosamente pelos programadores de navios através de suas experiências e conhecimentos referentes ao processo de programação. Neste sentido, algumas hipóteses para fins de simplificação foram adotadas na confecção do modelo.

A principal delas é que nele não está inserido nenhum tipo de roteirização. Diversos artigos científicos disponíveis na literatura propõem modelos matemáticos para resolver esta questão, no entanto, devido à complexidade presente na logística de movimentação de derivados, o seu desenvolvimento nesta dissertação iria tirar o foco sobre o dimensionamento da frota. Portanto, foi definido no modelo que os arcos sejam compostos por apenas um porto de carga e um porto de descarga.

Outra simplificação realizada foi a omissão de alguns portos onde a movimentação de derivados claros é inexpressiva comparada com o total movimentado. A utilização deles poderia contaminar os resultados e dificultar a interpretação por parte dos programadores.

A velocidade de navegação também foi um item simplificado na elaboração do modelo. Cada contrato de afretamento prevê a velocidade que determinado navio deve navegar sobre diversas condições, normalmente variando

entre 12 e 14 nós. Foi estabelecido uma velocidade média de 13 nós para todos os navios, o que na prática não irá desqualificar os resultados obtidos.

Outra questão que não foi levada em consideração na construção do modelo foi o gerenciamento de estoques nos portos de origem e destino. O termo em inglês encontrado na literatura para este tipo de abordagem é *maritime inventory routing*, e é definido por Christiansen *et al.* (2013) como sendo um problema de programação, onde um ator da cadeia de suprimentos possui a responsabilidade pelo gerenciamento dos estoques na origem e no destino, e também pela programação e roteamento dos navios. Esta é a situação encontrada na programação de navios da PETROBRAS. O programador preocupa-se em não deixar faltar produto para os clientes e simultaneamente em escoar a produção das refinarias de maneira adequada, evitando a perda de processamento de petróleo devido à falta de espaço nos terminais para armazenamento de derivados. No entanto, esta abordagem implica em atualizações diárias de dados e parâmetros, o que tornariam o modelo para dimensionamento de frota pouco funcional, uma vez que diariamente haveriam alterações na quantidade ótima de navios a ser alocados na frota.

Por último, é necessário levar em consideração que problemas operacionais podem acontecer no processo de produção de derivados nas refinarias, ou no seu armazenamento nos terminais. Desta forma, a qualidade do produto final pode ser alterada, impossibilitando que o mesmo seja fornecido diretamente ao mercado consumidor. Nestes casos, navios são programados para retirar o produto fora de especificação dos terminais e transportá-los para outros terminais ou refinarias onde haverá a correção do problema de qualidade. Esta situação não está prevista no modelo, pois não há como prever como e quando acontecerá este tipo de problema.

4.3

Nomenclatura utilizada e descrição do modelo proposto

Segue a abaixo a nomenclatura utilizada no modelo de dimensionamento da frota de navios de derivados claros da PETROBRAS:

Conjuntos:

Cód.	Índice	Nome	Descrição
V	v	Tipos de navios	Conjunto dos tipos de navios que irão compor a frota.
N	$\{i,j\}$	Nós	Conjunto de nós que representam os portos de carga e descarga.
P	p	Produtos	Conjunto dos produtos a serem transportados.

Parâmetros:

Cód.	Nome	Descrição	Unidade
N_{iv}	Constante	Nós que permitem a operação de cada um dos tipos de navios.	$\{0,1\}$
A_{ij}	Arco de movimentação	Parâmetro que define quais são os arcos entre os nós i e j onde existe oferta e demanda para um mesmo produto.	$\{0,1\}$
S_{ip}	Suprimento	Suprimento do produto p no nó i	m^3
D_{jp}	Demanda	Demanda do produto p no nó j	m^3
T_{ij}	Tempo	Tempo total de viagem e operação entre os nós i e j .	dias
H	Horizonte de planejamento	Horizonte de planejamento no qual a frota deverá ser dimensionada	dias
C_{vij}	Custo operacional	Custo formado pelo somatório dos custos de combustível e despesas portuárias em cada arco de movimentação.	Dólar
C_v^{TCP}	Custo fixo	Custo diário do contrato <i>Time Charter Party</i> por utilizar o navio do tipo v .	Dólar / dia
CL_{vi}	Calado	Volume máximo que pode ser carregado ou descarregado no navio do tipo v no porto i devido a restrições de calado.	m^3

Variáveis de decisão:

Cód.	Descrição	Unidade
x_{vij}	Variável igual ao número de viagens dos navios do tipo v entre os nós i e j .	Inteira
y_{vijp}	Quantidade de produto p transportada pelo navio do tipo v entre os nós i e j .	m^3
z_v	Variável igual ao número de navios do tipo v .	Inteira

Para que a variável x_{vij} seja criada, é necessária a existência do arco entre os nós i e j , conforme define o parâmetro A_{ij} , e que o navio do tipo v esteja apto a operar em ambos os nós, conforme define o parâmetro N_{iv} . Além disso, é necessário que as restrições de calado definidas pelo parâmetro CL_{vi} sejam cumpridas.

A criação da variável y_{vijp} também é restrita pelos parâmetros A_{ij} e N_{iv} . Ademais, é necessário limitá-la à demanda do nó j , conforme define o parâmetro D_{jp} .

Após definidos todos os conjuntos, índices, parâmetros e variáveis, o modelo matemático pode ser apresentado.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{v \in V} C_{vij} \cdot x_{vij} + \sum_{v \in V} H \cdot C_v^{TCP} \cdot z_v \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i \in N_{iv}} x_{vij} = \sum_{i \in N_{iv}} x_{vji} \quad \forall v, j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{v \in V} y_{vijp} \leq S_{ip} \quad \forall i, p \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{v \in V} y_{vijp} = D_{jp} \quad \forall j, p \quad (4)$$

$$\sum_p y_{vijp} \leq CL_{vi} x_{vij} \quad \forall v, i, j \quad (5)$$

$$\sum_p y_{vijp} \leq CL_{vj} x_{vij} \quad \forall v, i, j \quad (6)$$

$$\sum_{(i,j) \in N: A_j=1} T_{ij} x_{vij} \leq H.z_v \quad \forall v \quad (7)$$

Onde:

$$x_{vij} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall v, i, j \quad (8)$$

$$y_{vijp} \geq 0 \quad \forall v, i, j, p \quad (9)$$

$$z_v \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall v \quad (10)$$

A equação (1) é a função objetivo, que busca minimizar os custos totais da frota. O primeiro termo da equação representa a somatória dos custos variáveis, composto pelo custo dos combustíveis marítimos e pelas despesas portuárias. O segundo termo representa a somatória dos custos fixos, composto pelo custo do contrato de afretamento no período do horizonte de planejamento.

A equação (2) garante que todas as viagens iniciem e terminem no mesmo nó i . Ou seja, toda viagem é um ciclo completo.

A equação (3) restringe o volume a ser carregado no porto de carga ao volume disponível neste porto durante o horizonte de planejamento. A equação (4) garante que a demanda dos clientes nos portos de descarga será integralmente atendida.

As equações (5) e (6) restringem o volume a ser carregado nos portos de origem e descarregado nos portos de destino em função das restrições de calado.

A equação (7) assegura que o número de dias de operação para todos os navios de cada porte é menor ou igual ao número de dias disponíveis no horizonte de planejamento.

As equações (8), (9) e (10) apresentam o conjunto universo de cada uma das variáveis do sistema.

A plataforma de modelagem escolhida para solucionar o problema foi o AIMMS®, uma vez que esta é a mesma plataforma já utilizada pela PETROBRAS em outros modelos de otimização do transporte marítimo. Desta maneira, a disseminação do conteúdo e dos resultados entre os funcionários da empresa tende a ser facilitada. O solver utilizado para otimizar o problema foi o CPLEX, versão 12.6.