

DETERMINAÇÃO DE FROTA ÓTIMA DE ALIVIADORES PARA UM CONJUNTO DE PLATAFORMAS

Daniel Barry Fuller

Petróleo Brasileiro S. A. - Petrobras
Av. Nilo Peçanha, 151 / 7o. andar, Centro, 20020-100
Rio de Janeiro, RJ
fullerdb@petrobras.com.br

Edilson Fernandes de Arruda

Programa de Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra
de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do
Rio de Janeiro
Caixa Postal 68507, Rio de Janeiro RJ, 21941-972
efarruda@po.coppe.ufrj.br

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa de Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra
de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do
Rio de Janeiro
Caixa Postal 68507, Rio de Janeiro RJ, 21941-972
virgilio@ufrj.br

RESUMO

A produção de petróleo no mar é acumulada em plataformas e precisa ser transportada para seus destinos finais através de navios aliviadores. Um conjunto de plataformas pode economizar em afretamento de navios compartilhando uma frota, mas essa frota precisa de dimensionamento adequado para não causar paradas de produção. Propõe-se, nesse trabalho, um método probabilístico para determinar a quantidade ótima de aliviadores para atender um conjunto de plataformas considerando incertezas inerentes ao sistema.

PALAVRAS-CHAVE. Petróleo, Cadeia de Markov, Simulação.

Área principal: Métodos probabilísticos.

ABSTRACT

Offshore oil production is stored at platforms and needs to be transported to its final destination by shuttle vessels. A set of platforms can reduce shuttle-ship-hiring-costs by sharing the shuttle ships, but the fleet size needs to be properly determined in order not to cause production stoppages. This paper proposes a probabilistic method to determine the optimal quantity of shuttles to serve a set of platforms while considering the system's uncertainties.

KEYWORDS. Crude oil, Markov chain, Simulation.

Main area: Probabilistic methods.

1. Introdução

A produção marítima de petróleo (off-shore) é acumulada em plataformas. Esporadicamente, é necessário transportar essa produção para terminais, para que as refinarias sejam supridas, ou para atender exportações programadas. Esse transporte é realizado por navios aliviadores (shuttle vessels), que são demandados pelas plataformas para recolher a produção.

Há trabalhos que tratam da entrega de óleo em seu destino, como (Balram e Karimi, 2009); trabalhos que tratam da programação (scheduling) dos navios aliviadores, como (Jetlund e Karimi, 2004); e outros que tratam de aspectos de segurança e de desempenho das operações de alívio (offloading), como (Chen e Moan, 2004) e (Yan e Gu, 2010). No entanto, observa-se na prática uma oportunidade para ganhos no dimensionamento do sistema logístico de alívio das plataformas e não foram encontrados trabalhos que explorem essa necessidade. O objetivo do método apresentado neste trabalho é, portanto, definir a quantidade ótima de aliviadores que irá atender um conjunto de plataformas.

A Figura 1 mostra o esquema de alívio com três aliviadores para um conjunto de quatro plataformas. As plataformas indicadas com o ponto de exclamação requisitaram um alívio e serão atendidas pelos aliviadores ligados a elas por setas. O terceiro aliviador está transportando o óleo retirado anteriormente de alguma plataforma para seu destino. A Figura 2 mostra o fluxograma de atendimento de um chamado de uma plataforma.

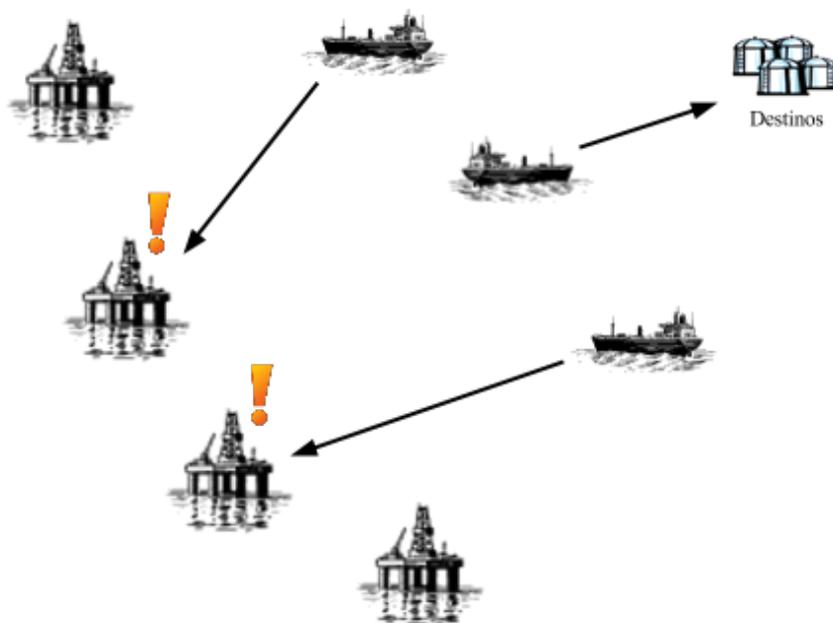


Figura 1: Esquema de alívio de plataformas.

São consideradas características mercadológicas e operacionais reais das plataformas e considera-se a possibilidade de se operar com uma frota heterogênea de aliviadores, embora trabalhe-se com as características médias dos aliviadores.

O método proposto é composto por duas fases. Na primeira, define-se a distribuição do intervalo entre necessidades de alívio para o conjunto de plataformas. Na segunda, calcula-se o lucro esperado para diferentes frotas, selecionando-se o melhor resultado.

A próxima seção mostra como o sistema foi modelado através de seus elementos. As demais seções ocupam-se com o detalhamento do método, casos de teste e conclusão.

2. Elementos do modelo

O sistema de alívio das plataformas é representado através dos elementos a seguir.

2.1. Plataformas de produção e armazenamento

As plataformas possuem diferentes características, sendo as relevantes para o problema em voga sua capacidade operacional de armazenamento, suas características de produção e seus custos de operação. O dimensionamento da frota de aliviadores é efetuado para um conjunto de plataformas, mas cada plataforma é considerada individualmente.

Para encontrar a capacidade operacional de uma plataforma, desconta-se, de sua capacidade total ou nominal, o lastro que deve ser mantido sempre nos tanques por questões construtivas das sucções ou para garantir a estabilidade das instalações de armazenamento. Enquanto cada plataforma possui sua capacidade volumétrica de produção diária própria, em todas elas essa produção é contínua. Interrupções são indesejadas e geram custos que reduzem a rentabilidade das plataformas.

Além do volume de produção diário, é relevante a qualidade do óleo produzido. Assim como na operação real, são definidas 3 classes de óleo. Óleos da classe 1 são aqueles dentro das especificações para serem retirados da plataforma. Óleos das classes 2 e 3 precisam, respectivamente, de tratamentos que duram 1 e 2 dias para tornarem-se óleos da classe 1 e poderem ser retirados da plataforma. A produção de cada classe de óleo varia ao longo do tempo, mas cada plataforma é capaz de fornecer um histórico ou uma previsão das probabilidades de produção de cada classe.

Uma nota relevante é que a capacidade de armazenamento de uma plataforma está dividida em diversos tanques individuais e as regras de alocação do óleo produzido aos tanques são importantes no curto prazo tanto para garantir a estabilidade das instalações quanto para afastar a necessidade de misturas de óleos de classes diferentes, o que gera perda de qualidade. Contudo, como o presente estudo aborda os efeitos médios de longo prazo para a contratação dos aliviadores, essa segregação em tanques será desprezada.

2.2. Navios aliviadores

A frota de aliviadores é composta por navios afretados por prazos longos. Não há disponibilidade para contratação de viagens extras, sendo, portanto, necessário definir-se antecipadamente uma quantidade suficiente de aliviadores que devem ser contratados para que todas as operações de alívio necessárias sejam realizadas sem acarretar atrasos e paradas de produção no conjunto de plataformas atendido.

Os aliviadores são definidos em termos de sua capacidade de transporte, de seu custo diário de afretamento e do o tempo de ciclo até que estejam novamente disponíveis para atender uma plataforma após terem efetuado um alívio.

O tempo de ciclo de um aliviador é definido como a soma dos tempos necessários a todas as operações cíclicas na Figura 2. Considera-se que a duração dos atendimentos é independente e constitui um processo de Poisson.

A programação dos aliviadores é feita considerando que os aliviadores estejam disponíveis para iniciar um alívio alguns dias antes de faltar espaço para armazenar a produção; esse tempo é chamado de *margem de segurança* e absorve questões de falhas e dificuldades operacionais (defeitos na conexão, mau tempo, etc).

A frota de aliviadores não precisa ser homogênea, mas trabalha-se com suas características médias. Isso é razoável, uma vez que não se procura considerar detalhes de programação e alocação dos navios. Esses detalhes são importantíssimos em estudos de curto prazo, tais como (Jetlund e Karimi, 2004), mas perdem relevância no longo prazo.

Vale ressaltar que o conjunto de plataforma analisado é definido pelo compartilhamento dos aliviadores. Uma vez que se defina uma regra de que alguns aliviadores atendem algumas plataformas e não outras, pode-se dimensionar as duas frotas independentemente, aplicando-se o método independentemente para cada conjunto de plataformas.

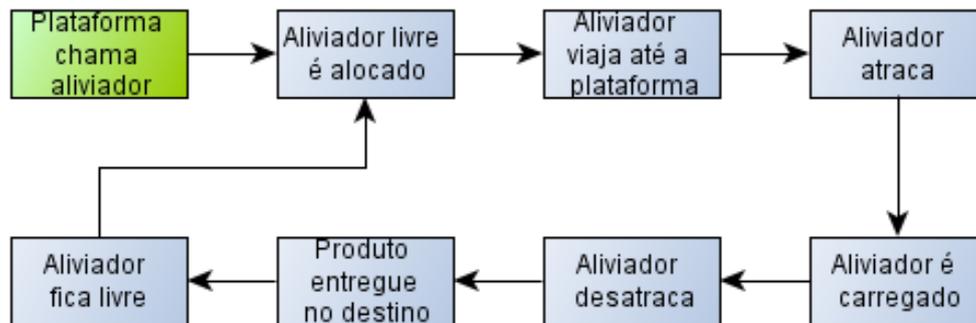


Figura 2: Fluxograma de atendimento de um chamado de uma plataforma.

2.3. Parâmetros econômicos

Para que se possa definir a rentabilidade do conjunto de plataformas, é necessário definir dois parâmetros econômicos: o valor que se espera obter com a venda do óleo produzido e a taxa do custo de oportunidade caso essa venda seja postergada devido a deficiências operacionais.

2.4. Configuração

Para a definição da distribuição de probabilidade do intervalo entre necessidades de alívio, feita por meio de simulação, necessita-se definir dois parâmetros: a quantidade de replicações e o horizonte de simulação. Já para o algoritmo de cálculo de rentabilidade, a ser abordado na próxima seção, deve-se definir a tolerância numérica desejável.

3. O método de dimensionamento de frota

Conforme mencionado na introdução, o método é composto por duas etapas que serão descritas separadamente.

Na primeira, determina-se, por simulação, a distribuição do intervalo entre necessidades de alívio do conjunto de plataformas. Na segunda, modela-se o sistema por meio de uma cadeia de Markov que permite definir a rentabilidade média do sistema com diversos tamanhos de frota de aliviadores.

3.1. Primeira etapa: definição da distribuição do intervalo entre necessidades de alívio

Um conjunto de plataformas tem uma demanda de alívios característica. Essa demanda é determinada pela demanda individual de cada plataforma, que, por sua vez, é derivada de suas características.

Nesta etapa, considera-se que a frota de aliviadores é bem dimensionada e, portanto, sempre que um alívio é necessário, ele pode ser realizado sem atraso.

A Figura 3 mostra o fluxograma do simulador. Cada plataforma tem sua produção diária simulada independentemente, mas as necessidades de alívio são registradas em conjunto. Esse registro de dias em que houve alívio no sistema é convertido em um conjunto de intervalos entre alívios e, daí, é inferida a probabilidade de cada intervalo ocorrer.

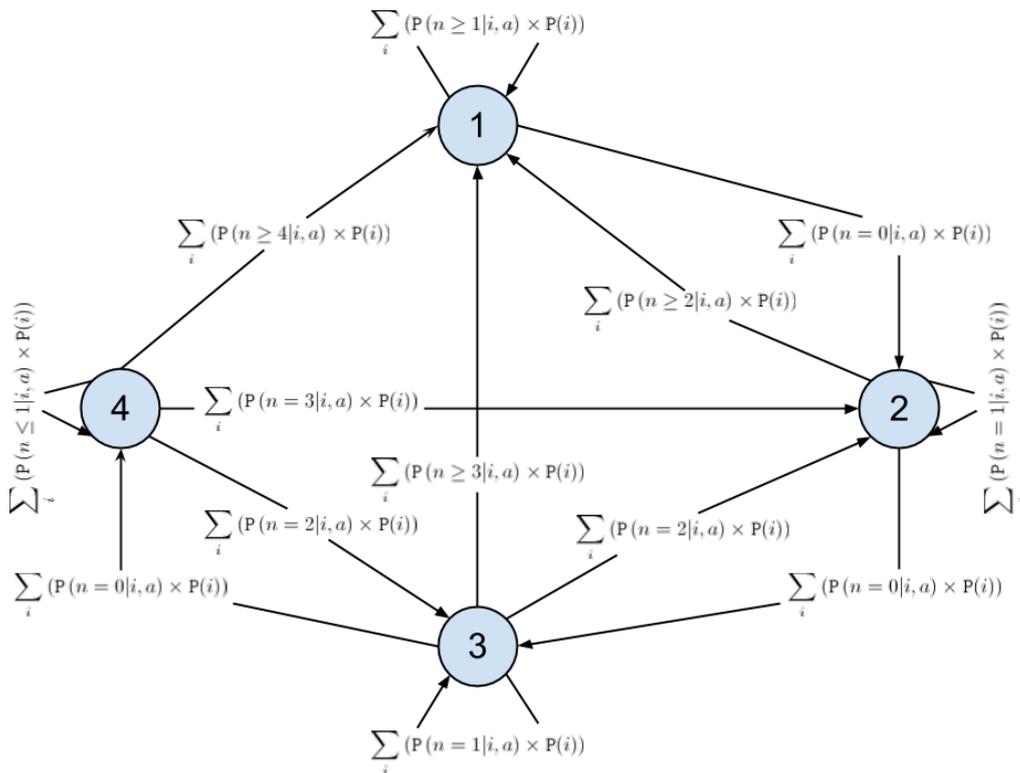


Figura 4: Transições para um conjunto de quatro plataformas.

A probabilidade de transição do estado s_k para o estado s_{k+1} , com uma frota contratada de a aliviadores, é dada por:

$$P(s_{k+1}|s_k, a) = \sum_I P(s_{k+1}|s_k, i, a) \times P(i). \quad (1)$$

$P(i)$ é a probabilidade de que o intervalo entre as chamadas, encontrada na primeira etapa do método, seja igual a i dias, sendo I o conjunto discreto de todos os intervalos possíveis (em dias) entre as chamadas.

A probabilidade de ocorrer o estado s_{k+1} , dados o estado atual s_k , o número de dias entre chamadas i e o tamanho da frota de aliviadores a depende da quantidade n de aliviadores que passou a estar disponível desde a última transição e é dada por:

$$P(s_{k+1}|s_k, i, a) = \begin{cases} 0 & \text{se } s_{k+1} - s_k > 1 \\ P(n \leq 1|i, a) & \text{se } s_{k+1} - s_k \leq 1 \text{ e } s_k = s_{k+1} = |S| \\ P(n \geq s_k|i, a) & \text{se } s_{k+1} - s_k \leq 1 \text{ e } s_{k+1} = 1 \\ P(n = s_k - s_{k+1} + 1|i, a) & \text{c.c.} \end{cases} \quad (2)$$

As transições ocorrem entre duas chamadas consecutivas, o que significa que há apenas uma chamada nova por intervalo. Assim $P(s_{k+1} - s_k > 1) = 0$, como explicitado no primeiro caso.

Os demais casos são disjuntos do primeiro e o segundo, $s_k = s_{k+1} = |S|$, define que não há mais chamadas do que plataformas. Isso decorre do fato que uma plataforma parada não produz e, portanto, não precisa solicitar uma segunda retirada. Isso também determina que o número de estados possíveis é finito.

A terceira possibilidade, $s_{k+1} = 1$, trata dos casos em que há mais navios aliviadores disponíveis do que anteriormente demandados (todas as demandas foram encerradas no período), resultando que a nova demanda é a única pendente.

A quarta expressão cobre todos os demais casos.

A probabilidade de haver n navios disponíveis dados um tamanho de frota a e um intervalo de tempo i é definida por:

$$P(n = x | i, a) = \begin{cases} 0 & \text{se } x > a \\ 1 - \sum_{k=0}^{a-1} P(n = k | i, a) & \text{se } x = a \\ \tau^x \times \frac{e^{-\tau}}{x!} & \text{c.c.} \end{cases} \quad (3)$$

Sendo $\tau = 24 \times \bar{i} \times \frac{a}{t}$ o parâmetro de uma distribuição exponencial em que \bar{i} é o intervalo médio (em dias) entre chamadas, a é o tamanho da frota de aliviadores, t é o tempo médio de ciclo dos aliviadores (em horas) e a constante 24 harmoniza as unidades. A escolha dessa distribuição decorre da definição do tempo de ciclo dos aliviadores como um processo de Poisson.

Os três casos representam, respectivamente, a impossibilidade de haver mais navios disponíveis que navios na frota, que a probabilidade de todos os navios estarem disponíveis é complementar à soma dos casos em que há menos navios disponíveis e os casos em que há menos navios disponíveis que na frota. Definir o segundo caso como um complementar trunca a cauda da distribuição exponencial e garante que $\sum_{x \in A} P(n = x | i, a) = 1$. A é o conjunto de possíveis tamanhos de frota.

Observa-se que as matrizes de probabilidade de transição da cadeia de Markov homogênea não possuem classes de comunicação distintas, sendo, portanto, irredutíveis. Como, além disso, o espaço de estados é finito, a cadeia é recorrente positiva (Brémaud, P., 1999; Hillier e Lieberman, 2010) e, portanto, possui uma distribuição estacionária. Para encontrar-se essa distribuição estacionária, resolve-se, com a precisão numérica definida nos parâmetros do método, o sistema $d^t(a) \times P(a) = d^t(a)$, em que $P(a)$ é a matriz de transições com uma frota de a aliviadores cujos elementos são $p_{s_k, s_{k+1}}(a) = P(s_{k+1} | s_k, a)$ e $d(a)$ é o vetor com a distribuição estacionária para a mesma frota.

Com a distribuição estacionária d , calcula-se a rentabilidade L do sistema com uma frota de a aliviadores:

$$L(a) = R(a) - C_f(a) - C_a(a) - C_p, \quad (4)$$

onde define-se:

A receita esperada pela venda do óleo produzido:

$$R(a) = \sum_{s=1}^{|S|} \left(d_s(a) \times \begin{cases} |S| \times q \times v & \text{se } s \leq a \\ (|S| - (s - a)) \times q \times v & \text{c.c.} \end{cases} \right), \quad (5)$$

em que s é um estado, a é o tamanho da frota de aliviadores, q é o volume médio diário nominal de óleo produzido pelas plataformas e v é valor esperado de venda de uma unidade de óleo. Sempre que houver menos demanda por alívios que aliviadores na frota ($s \leq a$), a produção de óleo é total (q); caso contrário, haverá uma redução na produção, uma vez que $(|S| - (s - a)) \times q < |S| \times q, \quad \forall s > a$.

O custo financeiro pelo atraso na produção:

$$C_f(a) = \sum_{s=1}^{|S|} \begin{cases} 0 & \text{se } s \leq a \\ d_s(a) \times (s-a) \times q \times v \times z & \text{c.c.} \end{cases}, \quad (6)$$

em que z é a taxa de atratividade diária da venda do óleo. $C_f(a)$ é nulo sempre que houver menos demanda por alívios que aliviadores na frota.

O custo de afretamento dos aliviadores: $C_a(a) = C_{aliv} \times a$, em que C_{aliv} é o custo médio diário de afretamento de um navio aliviador.

O custo de operação das plataformas: $C_p = C_{plat} \times |S|$, em que C_{plat} é o custo médio diário de operação de uma plataforma.

A solução para o problema é, então

$$a^* = \operatorname{argmax}_{a \in A} L(a). \quad (7)$$

4. Casos de teste

Como os valores reais não são disponíveis para publicação, diferentes cenários foram sintetizados a partir dos dados reais para mostrar a sensibilidade do método aos parâmetros e sua aplicação a diversos valores possíveis de parâmetros. Os parâmetros do método foram definidos como:

- Quantidade de replicações na simulação da primeira etapa: 100.
- Horizonte da simulação: 30 anos.
- Tolerância numérica: 10^{-3} .

4.1. 4 plataformas

A Tabela 1 mostra as características das plataformas usadas nos testes.

Tabela 1: Características das plataformas usadas no teste

Capacidade [dam ³]	Custo Operacional [k\$/dia]	Produção [m ³ /dia]	Probabilidade de produção		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
200	40	14.400	15%	55%	30%
150	40	12.000	20%	30%	50%
150	40	10.800	10%	70%	20%
120	40	10.000	12%	64%	24%

Os valores considerados para as características dos aliviadores e aspectos financeiros dependem dos cenários definidos conforme a Tabela 2. Os valores em negrito destacam as diferenças com relação ao cenário Base.

Para cada cenário, foram obtidos o lucro diário esperado e a quantidade de aliviadores pelo método apresentado. O resultados estão na Tabela 3. Para referência, a última coluna contém a quantidade de aliviadores mínima para que a fila de necessidades de alívio não divirja ($\frac{t}{24 \times i}$).

Tabela 2: Características das plataformas usadas no teste

Cenário	Capacidade	Custo por aliviador	Tempo de ciclo	Margem de segurança	Valor por barril	Taxa de atratividade
	[dam ³]	[k\$/dia]	[h/ciclo]	[dias de produção]	[%/bbl]	[% a.a.]
Base	100	20	48	2	80	20
01	60	20	48	2	80	20
02	140	20	48	2	80	20
03	100	30	48	2	80	20
04	100	10	48	2	80	20
05	100	20	36	2	80	20
06	100	20	60	2	80	20
07	100	20	48	2	40	20
08	100	20	48	2	120	20
09	100	20	48	2	80	15
10	100	20	48	2	80	25
11	100	2	48	2	80	20
12	100	200	48	2	80	20

Tabela 3: Resultados dos testes com quatro plataformas

Cenário	Lucro [k\$/dia]	Quantidade ótima de aliviadores (a^*)	Ponto de equilíbrio
Base	23.530	3	0,97
1	23.511	4	1,57
2	23.530	3	0,82
3	23.500	3	0,97
4	23.560	3	0,97
5	23.531	3	0,73
6	23.523	3	1,21
7	11.655	3	0,97
8	35.405	3	0,97
9	23.530	3	0,97
10	23.530	3	0,97
11	23.584	3	0,97
12	22.990	3	0,97

4.2. 32 plataformas

Para 32 plataformas, reproduziu-se cada uma das plataformas da Tabela 1 oito vezes e utilizou-se os mesmos cenários da Tabela 2. Os resultados obtidos estão na Tabela 4.

5. Conclusão

Os testes com quatro plataformas serviram para mostrar que os resultados obtidos pelo método foram coerentes com os efeitos esperados das variações dos parâmetros de entrada.

Os testes com 32 plataformas servem para analisar melhor a sensibilidade dos resultados a variações nos parâmetros de entrada.

Tabela 4: Resultados dos testes com 32 plataformas

Cenário	Lucro [k\$/dia]	Quantidade ótima de aliviadores (a^*)	Ponto de equilíbrio
Base	188.505	11	7,76
1	188.403	16	12,59
2	188.527	10	6,58
3	188.395	11	7,76
4	188.615	11	7,76
5	188.546	9	5,82
6	188.464	13	9,69
7	93.502	11	7,76
8	283.507	11	7,76
9	188.505	11	7,76
10	188.505	11	7,76
11	188.704	12	7,76
12	188.657	10	7,76

O resultado é bastante sensível a alterações na capacidade média dos aliviadores. Especialmente quando a capacidade é reduzida (Cenário 01), uma vez que uma redução de 40% resultou em um aumento de 46% da frota ótima.

Com relação à razão entre os custos dos aliviadores e das plataformas (Cenários 03, 04, 11 e 12), o modelo não se apresentou muito sensível.

O tempo de ciclo dos navios aliviadores (Cenários 05 e 06) causa impacto significativo nos resultados.

O modelo mostrou-se pouco sensível aos parâmetros financeiros (Cenário 07, 08, 09 e 10). De certa forma, isso indica a robustez das soluções, uma vez que oscilações mercadológicas têm baixo impacto na necessidade de aliviadores (apesar do valor de venda do óleo afetar fortemente o lucro esperado).

O método foi implementado para os testes (sem otimização de código) em Java e executado em um computador AMD Phenom II X4 925 com 4GB de memória RAM e sistema operacional Windows 8. O tempo de resolução (das duas etapas) foi de um segundo para 4 plataformas e 5 segundos para 32 plataformas.

Como possíveis trabalhos futuros, destaca-se:

- Aprimorar a seleção de frotas candidatas, a fim de minimizar a repetição do cálculo de rentabilidade.
- Aplicar o método a outras áreas que tenham pontos de estoque atendido por uma frota compartilhada.

Por fim, considera-se que o método é robusto o suficiente para ser aplicado em situações reais.

Referências

Balram, S. e Karimi, I. (2009), Crude Oil Transshipment Using Floating, Storage, and Offloading Platforms (FSOPs), in "10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A", Vol. 27 of *Computer Aided Chemical Engineering*, Elsevier,

pp. 2085–2090.

URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70738-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70738-2)

Brémaud, P. (1999), *Gibbs fields, monte carlo simulation and queues*, Springer-Verlag, New York.

Chen, H. e Moan, T. (2004), “Probabilistic modeling and evaluation of collision between shuttle tanker and FPSO in tandem offloading”, *Reliability Engineering & System Safety* **84**(2), 169–186.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2003.10.015>

Hillier, F. S. e Lieberman, G. J. (2010), *Introdução à Pesquisa Operacional*, 8a. ed, McGraw-Hill, Porto Alegre.

Jetlund, A. S. e Karimi, I. (2004), “Improving the logistics of multi-compartment chemical tankers”, *Computers & Chemical Engineering* **28**(8), 1267–1283.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.08.009>

Yan, G. e Gu, Y. (2010), “Effect of parameters on performance of LNG-FPSO offloading system in offshore associated gas fields”, *Applied Energy* **87**(11), 3393–3400.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.032>