

# **MODELO TÁTICO DE DECISÃO PARA RESPOSTA EMERGENCIAL A DERRAMAMENTOS DE PETRÓLEO NO MAR**

**Larissa Albino da Silva Santos**

Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro  
[albino.larissa@gmail.com](mailto:albino.larissa@gmail.com)

**Lucio Guido Tapia Carpio**

Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro  
[guido@ppe.ufrj.br](mailto:guido@ppe.ufrj.br)

## **Resumo**

Este trabalho desenvolve um modelo determinístico de resposta ao nível tático para atendimento de derramamento de óleo no mar, utilizando um modelo de programação linear inteira. O modelo analisa o melhor custo-benefício associado a cada cenário de derramamento, incluindo diversos parâmetros que governam a tomada de decisão para a resposta de um derramamento, tais como: (i) impactos para diferentes comportamentos da Equipe Operacional de Resposta, (ii) grau de sensibilidade dos ecossistemas impactados, (iii) volume derramado, (iv) restrições legais e operacionais e (v) condições meteo-oceanográficas. Um estudo de caso foi realizado, de forma a verificar os resultados do modelo diante da estrutura de resposta coordenada pelo Plano de Emergência Individual de um empreendimento de exploração e produção de petróleo na Bacia de Campos (RJ) – região onde esta atividade é intensa. Dentre uma das principais conclusões apresentadas no presente trabalho, observou-se que o modelo proposto pode ser uma ferramenta útil para analisar a eficiência da estrutura dos planos de contingência, esta conclusão é obtida realizando estudos de análises de sensibilidade dos parâmetros que são decididos aos níveis estratégico e operacional. Assim, embora este tipo de modelagem não seja uma condicionante legal para vias de licenciamento, sua aplicação proporcionaria aperfeiçoamento nas estratégias de resposta aos derramamentos.

**Palavras-Chaves:** Gestão de Qualidade; Logística e Transporte; Programação Matemática.

## **Abstract**

A tactical deterministic model was developed for attending oil spill clean-up operations, by using integer linear programming. The model analyzes the best cost-benefit associated to each scenario spill, including various parameters that govern the decision making for a spill response: (i) behavior from the operation clean-up team, (ii) sensibility degree of each ecosystem (iii) volume spilled, (iv) legal and operational restrictions and (v) meteo-oceanographic conditions. A study case was applied for the Campos Basin (Rio de Janeiro - Brazil) which is coordinated by the Individual Emergency Plan and where the exploration and production of oil is intense. One of the main results observed was that the model is a useful tool to verify the effectiveness of contingency plans, provided by the sensitivity analysis on the parameters that are decided at the strategic level and the operational level. Therefore its application would provide an improvement in the responses of projects whose environmental impacts would be severe in case of accidents.

**Keywords:** Quality management; Logistics and Transport; Mathematical programming

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo produz bens que são insumos de difícil substituição na matriz produtiva de qualquer país, sendo estes insumos pilares para o modo de produção e consumo da nossa sociedade (CANELAS, 2007). Embora se verifique avanços na participação de outras fontes de energia na matriz energética mundial, o petróleo ainda é e será por um longo período a principal participante desta matriz. De acordo com as projeções até o ano de 2030, os derivados do petróleo no Brasil devem permanecer na liderança da matriz energética, ainda que sua participação caia para algo entre 35% a 37% em 2030 (EPE, 2007).

O Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2013 ressalta que o país vem se destacando no aumento da produção de petróleo e de gás natural, principalmente devido às reservas provadas nas bacias sedimentares localizadas no mar. Estas bacias se destacam na produção deste minério em relação às bacias sedimentares continentais. Além disso, a camada do pré-sal vem contribuindo fortemente para o aumento na produção das bacias sedimentares marinhas. As atuais reservas são quase 50% maiores do que as de dez anos atrás, quando o petróleo do pré-sal nas bacias de Santos e Campos ainda não havia sido descoberto (ANP, 2013).

O recente acidente ocorrido no Golfo do México em 2010, considerado como um dos mais graves acidentes da indústria do petróleo (BROWNER, 2010), mostra a vulnerabilidade da exploração e produção de petróleo. Nesse episódio, a plataforma semi submersível (Deepwater Horizon) explodiu após ficar dois dias em chamas, espalhando pelo menos 75 milhões barris de óleo no mar, o qual alcançou a costa de Lousiana nos Estados Unidos. Houve um gasto aproximado de US\$ 940 milhões somente para conter o vazamento (FOLHA, 2010).

Comparado com as outras fontes de poluição marinha, o derramamento de óleo no mar representa uma das maiores ameaças à ecologia marinha, pois (i) modifica as condições ambientais para os animais marinhos pela alteração química do mar; (ii) altera as propriedades físicas do mar; (iii) muda o equilíbrio biológico e (iv) destrói da biomassa nutricional marinha (REDONDO e PLATANOV, 2009).

Esses acidentes alertam quanto à necessidade de se pensar acerca dos riscos ambientais inerentes à atividade de exploração e produção de petróleo. CALIXTO (2011) coloca que, pelo histórico de acidentes na indústria do petróleo no Brasil e sua frequente recorrência, o país precisa estar preparado para combater o vazamento de petróleo e derivados, fundamentalmente devido ao aumento das atividades na província do pré-sal e pela considerável biodiversidade da fauna e da flora marinha existente no país. Para tanto, dever-se-ia aprimorar os planos de contingência em seus diversos níveis.

Com a expectativa de aumento de produção em regiões que apresentam condições inóspitas para a exploração de petróleo— como a região do pré-sal -, associada com a necessidade de aprimorar a prevenção e as respostas emergenciais, a adoção de instrumentos que ajudem a coordenar ações ligadas ao combate de derramamentos de óleo no mar é um subsídio valioso para aperfeiçoar o atendimento a acidentes desta natureza.

Assim, conhecendo-se os parâmetros que governam um incidente de óleo no mar, torna-se possível alcançar a melhor estratégia viável que permita enviar o tipo e a quantidade correta de equipamentos de limpeza e contenção. Entende-se como a melhor estratégia viável aquela que reduza o custo da operação, reduza o tempo de resposta, reduza o dano ambiental e que permita aumentar a área de cobertura das ações de resposta; considerando as restrições legais e técnicas do problema.

Alguns autores analisaram o problema neste contexto, conhecido como resposta ao nível tático, em que os parâmetros da ocorrência de um derramamento de um tipo de óleo específico estão definidos e pretende-se decidir quais equipamentos despachar e em que quantidade para recuperar o óleo derramado (PSARAFTIS e ZIOGAS, 1985; SRINIVASA e WILHELM, 1997, GKONIS, VENTIKOS, PSARAFTIS *et al.* 2008).

Outros autores analisaram o problema sob o nível estratégico, no qual se pretende verificar a melhor localização dos centros de atendimento de resposta, bem como a quantidade e o tipo de equipamentos que serão capazes de atender a qualquer derramamento de óleo para uma determinada área (CHARNES, COOPER *et al.*, 1979; PSARAFTIS, THARAKAN e CEDER, 1996; IAKOVOU, CHI, DOULIGERIS *et al.*, 1996).

Existe ainda o nível operacional para a tomada de decisão para o atendimento a um derramamento de óleo, cujo objetivo é determinar a melhor utilização dos equipamentos previstos no nível tático para contenção e limpeza (PSARAFTIS e ZIOGAS, 1985).

A proposta deste trabalho se limita a formular um modelo ao nível tático, de forma a verificar o custo-benefício associado à resposta da equipe responsável da dar resposta a um derramamento de óleo no mar. Para tanto, elaborou-se um modelo que inclui os custos operacionais e logísticos, bem como os benefícios trazidos pela limpeza de um derramamento que potencialmente iria causar impactos ambientais, atendendo as restrições legais e técnicas. Aplicou-se o modelo a um empreendimento de Produção e Exploração de Petróleo e Gás Natural na Bacia de Campos (Rio de Janeiro, Brasil).

Na segunda seção define-se o problema e descreve-se a formulação matemática do modelo. Na terceira seção, aplica-se o modelo no estudo de caso com a discussão dos resultados encontrados e na quarta seção descrevem-se as principais conclusões do presente trabalho.

## **2. O MODELO TÁTICO**

### **2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA**

O problema a ser modelado procura a decisão ao nível tático para dar resposta emergencial a determinado derramamento de óleo no mar, baseado no modelo de GKONIS, VENTIKOS *et al.* (2008), onde são determinadas ações a serem executadas para um dado acidente de características conhecidas. Assume-se, portanto, que o problema seja determinístico, de modo que os parâmetros que governam um incidente de óleo no mar são conhecidos. Pretende-se saber na ação de resposta quais equipamentos devem ser despachados e quais centros de respostas devem ser acionados para o atendimento ao acidente.

O problema da tomada de decisão nesse nível é descrita da seguinte maneira. Um derramamento ocorre em uma dada área de influência, cujas características são conhecidas (tipo de óleo, eficiência de cada equipamento, direção da mancha de óleo, possibilidade de atingir a costa, vazão do derramamento, condições meteoceanográficas). Os centros de resposta, a quantidade e o tipo de equipamentos de limpeza e contenção em cada centro de resposta, foram definidos anteriormente no nível estratégico. O local do acidente é conhecido.

O tomador de decisão, o qual, conforme a restrição legal do Brasil, é representado pelos membros da coordenação da Equipe Organizacional de Resposta (EOR) – após receber a notificação do acidente - precisa decidir de quais centros de resposta os equipamentos que devem ser despachados, bem como as quantidades de cada tipo de equipamento que deve ser transportada até o local do acidente (Figura 1).

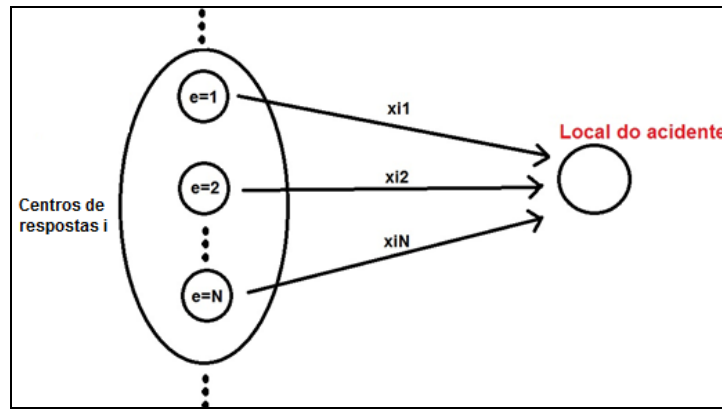


Figura 1: Ilustração do problema tático. Após um acidente de óleo, necessita-se definir de quais centros de resposta os equipamentos de resposta  $e$  devem ser despachados. *Nota: “ $x_{ie}$  corresponde à quantidade de equipamentos do tipo  $e$  que serão despachados do centro de resposta  $i$ ;  $N$  corresponde à quantidade de tipos de equipamentos disponíveis em cada centro de resposta”.*

Por tanto, a solução ótima do modelo consiste em encontrar essa combinação de seleção de quantidade e tipo de equipamentos que devem ser despachadas dos centros de resposta, de forma a minimizar a diferença entre o custo e o benefício da operação de contenção e de limpeza do óleo derramado, de acordo com as condições meteoceanográficas locais e as condições legais do Conama’s nº 398 / 2008 e nº 269 / 2000.

## 2.2. Formulação Matemática do Modelo

Os parâmetros gerais do modelo são descritos abaixo.

$I$  e  $E$  representam os conjuntos de: centros de respostas e tipo de equipamentos;

$i \in I$  Centro de resposta a ser acionado;

$e \in E$  Tipo de equipamento de resposta;

$u_e$  ( $m^3/h$ ): Capacidade nominal de recuperação de óleo de uma unidade do equipamento tipo  $e$ .

$RE_e$ : Eficiência de recuperação de óleo no mar do equipamento tipo  $e$ ;

$T_{ie}$  (h): Tempo para operação de limpeza no local do acidente com uma unidade de equipamento tipo  $e$  despachado do centro de resposta  $i$ .

$D_e$  : Demanda mínima do equipamento  $e$  para atender o derramamento de óleo. Seu dimensionamento é realizado de acordo com as diretrizes nº 398/08 estabelecidas pelo Conama;

$v$  ( $m^3$ ): Volume estimado do óleo derramado;

$N_{ie}$  : Estoque disponível do equipamento tipo  $e$ , no centro de resposta  $i$ ;

$CC$ : Coeficiente de cobertura desejado do óleo derramado ( $CC=1$  corresponde à área total do óleo derramado). Este coeficiente é escolhido pelo tomador de decisão, após análise das condições meteoceanográficas no local do acidente, das questões de segurança operacional e do volume de óleo desejável a ser recuperado;

$DC_e$ : Parâmetro que determina quantos equipamentos do tipo  $e$  são operacionais diante do tipo de óleo derramado e o estado do mar;

$DT_{ie}$ : Parâmetro que determina quantos equipamentos do tipo  $e$  podem ser despachados dos centros de resposta  $i$  para atender o derramamento dentro do tempo legal de resposta.

$SDC$ : Coeficiente do sistema/dano: Este valor é definido pelo tomador de decisão. Sua decisão deve ser pautada no valor relativo de uma unidade monetária gasta para responder o incidente comparado com o valor de uma unidade monetária do dano causado pelo incidente. Em outras palavras, o  $SDC$  revela a disposição a pagar que temo tomador de decisão para

amenizar os impactos causados pelo incidente em relação ao custo da operação de resposta ao incidente. Valores de SDC acima de uma unidade, demonstra que para o tomador de decisão é mais importante responder ao incidente diante dos potenciais impactos causados ao meio ambiente, em detrimento ao custo logístico e operacional da resposta ao acidente. Valores inferiores a uma unidade representa que o tomador de decisão atribui um peso maior para os custos logísticos e operacionais da resposta. Se o valor for igual a um, tem-se que o tomador de decisão atribui a mesma importância entre os custos associados aos impactos ambientais e os custos logísticos e operacionais da resposta;

DP : Coeficiente de potencial dano causado pelo derramamento de óleo. Este valor representa a estimativa realizada para relacionar os danos ambientais causados por acidentes de derramamento de óleo. Neste trabalho, adaptou-se a metodologia elaborada por MARCELINO, HADDAD *et al.*, 1992, também conhecida como Modelo Cetesb.

CO<sub>o</sub>: Custo do óleo do tipo *o*;

CT<sub>i</sub> (R\$) : Custo de se transportar equipamentos de contenção e de limpeza desde o centro de resposta *i*

b<sub>e</sub> (R\$/h) : Custo operacional de limpeza de uma unidade do equipamento tipo *e*;

As **variáveis de decisão** são:

x<sub>ie</sub> : É a variável de decisão, que representa a quantidade de equipamentos do tipo *e* despachados a partir do centro de resposta *i* para atender o acidente de óleo;  $\forall i \in I$  e  $\forall e \in E$ .

### 2.2.1. Função Objetivo e Restrições

O objetivo é minimizar a função de custos associados às operações de limpeza de um derramamento de óleo, composto pelo custo da resposta menos o benefício da resposta.

$$Min = \sum_i \sum_e x_{ie} (C.T_i + b_e.T_{ie} - SDC \cdot u_e.T_{ie} \cdot RE_e \cdot CO_o \cdot DP)$$

O termo em evidência representa os custos associados à parte logística (CT<sub>i</sub>) e operacional (b<sub>e</sub>T<sub>ie</sub>) da resposta, subtraindo-se pelo benefício proporcionado pela resposta diante da retirada do óleo em um ambiente marinho de determinada sensibilidade ambiental. Assim, quanto maior o volume de óleo retirado pela resposta, maior será o benefício proporcionado, uma vez que o óleo deixará de causar impactos ambientais no ambiente marinho.

As restrições do problema são as seguintes:

$$x_{ie} \geq 0, \text{ inteiros}, \forall i \in I, e \in E \dots\dots\dots(1)$$

A restrição acima estabelece que a variável de decisão assumirá valores não-negativos e inteiros.

$$x_{ie} \leq N_{ie} \quad \forall i \in I, e \in E \dots\dots\dots(2)$$

Essa restrição está associada à capacidade máxima de equipamentos *e* que estão nos centros de resposta *i*. A variável de decisão x<sub>ie</sub>, evidentemente, não pode ser maior do que esse valor N<sub>ie</sub>;

$$\sum_i x_{ie} \geq D_e, \forall e \in E \dots\dots\dots(3)$$

A restrição acima se refere à necessidade de atender a demanda por equipamento  $e$ . Os valores são definidos através das diretrizes estabelecidas pelo Conama nº 398 de 2008, os quais são proporcionais ao volume derramado.

$$\sum_i \sum_e x_{ie} \cdot RE_e \cdot u_e \cdot T_{ie} \leq CC \cdot v \dots\dots\dots(4)$$

Acima, observa-se que a restrição ajusta a eficiência operacional de cada equipamento de limpeza  $e$  com o tempo de operação de limpeza. O limite superior, representando pelo termo à direita, impõe o volume desejado de retirada do óleo, de acordo com a segurança operacional. Para um coeficiente de cobertura (CC) maiores do que 1, entende-se que se deseja despachar equipamentos extras dos centros de resposta  $i$ , tornando-se uma margem de segurança;

$$x_{ie} \leq DC_{ie} \quad \forall i \in I, \forall e \in E \dots\dots\dots(5)$$

A restrição acima determina que somente equipamentos operacionais  $e$  em relação às condições climáticas vigentes, ao estado do mar e ao tipo de óleo derramado que podem ser despachados do centro de resposta  $i$  para atender o incidente de óleo.

$$x_{ie} \leq DT_{ie} \quad \forall i \in I, e \in E \dots\dots\dots(6)$$

Esta última restrição determina que o despacho de equipamento  $e$  do centro de resposta  $i$  para atender o derramamento só pode ser feito dentro do tempo permitido pela legislação.

Assim, define-se o problema tático como sendo um problema de programação linear inteira. A variável de decisão que obedece às restrições do problema e que minimiza a função objetivo é a solução do problema. Como a variável de decisão  $x_{ie}$  deve ser inteira, aplica-se o método *branch-and-bound*.

### 3. ESTUDO DE CASO

Esta seção apresenta os resultados da aplicação do modelo tático, executado pelo programa Lingo 11.0, para a plataforma de petróleo localizada na Bacia de Campos (RJ) - operada pela empresa OGX, através das unidades de produção BM-C-39 e BM-C-40.

A área de estudo apresenta relevantes recursos biológicos, sendo rota migratória para diversos grupos de mamíferos, além de ser uma região de intensa produtividade biológica, uma vez que apresenta o fenômeno de ressurgência (MMA, 2007). Além disso, a área apresenta 37 unidades de conservação e importantes ecossistemas típicos de regiões costeiras, tais como praias, falésias, costões rochosos e manguezais.

Neste trabalho, pela limitação de espaço, são apresentados apenas dois cenários expostos na Tabela 1 que se segue, e foram escolhidos de forma a avaliar os casos opostos – o cenário médio (o mais brando) e o cenário extremo (afundamento total da unidade estacionária de produção). A estrutura do Plano de Ação do empreendimento, representado pelo Plano de Emergência Individual do Empreendimento, contém todos os dados necessários para o cálculo do custo operacional, logístico, demanda mínima de equipamentos, distância dos centros de resposta em relação ao local de acidente (Tabela 2) e quantidade disponível de cada equipamento em cada centro de resposta.

Tabela 1: Vazão (m<sup>3</sup>) de óleo por hora e volume total derramado (m<sup>3</sup>) por dia para cada cenário. Fonte: Elaboração própria conforme dados da AECOM (2011)

Volume /Cenários	Cenário médio	Cenário extremo*
Vazão do derramamento (m <sup>3</sup> /h)	20,8	10.069,9
Volume máx. (m <sup>3</sup> )	500/dia	231.675,5

\*Afundamento total da unidade estacionária de produção.

Tabela 2: Distância dos centros de resposta em relação às unidades de produção. Fonte: Elaboração própria conforme dados da AECOM (2011).

Centro de Resposta	Tipo	Distância (MN)	Distância (km)
Embarcação Thor Supplier	Centro móvel	193,85	352,81
Embarcação Campos Captain	Centro móvel	123	223,86
Embarcação Santos Supplier	Centro móvel	60	109,2
Embarcação dedicada	Centro móvel	20	36,4
Base Rio de Janeiro (RJ)	Centro fixo	124	225,68
Base Arraial do Cabo (RJ)	Centro fixo	57	103,74
Base Santos (SP)	Centro fixo	290	527,8
Base Itajaí (SC)	Centro fixo	470	855,4

Considerou-se que as condições meteo-oceanográficas se encaixavam na escala Beaufort entre 0 e 1, situação em que todos os equipamentos são operantes. O coeficiente de cobertura desejado foi estabelecido sendo como 100% do volume derramado estimado (CC = 1).

A velocidade média das embarcações é de 18,5 km/h (10 nós) e os valores de SDC considerado foram de uma unidade. A eficiência dos recolhedores considerada foi a mesma que é estabelecida pela legislação (0,2). Estas premissas foram mantidas para a solução inicial dos dois cenários, excetuando-se àquelas em que foram efetuadas as análises de sensibilidade. Por fim, efetuaram-se análises para o verão e para o inverno, de modo a verificar a solução do modelo em cenários cuja probabilidade do óleo atingir a costa é maior (inverno) em relação às menores probabilidades para este evento (verão).

As análises de sensibilidade compreenderam a variação nos seguintes parâmetros para cada cenário:

- Disponibilidade dos recursos nos centros de resposta;
- SDC;

Esclarece-se que as alterações foram realizadas apenas nos parâmetros analisados, os demais se mantiveram idênticos como na solução inicial.

### 3.1. Solução do problema e análise dos resultados

#### 3.1.1. Cenário Médio

Neste cenário, assume-se que há um fluxo de 20,8 m<sup>3</sup> de óleo por hora, o qual, no final de um dia, resulta em um total de 500 m<sup>3</sup> de óleo derramado, considerando que nenhuma ação intempélica é atuante sobre o óleo. Além disso, considerou-se um tempo de trabalho operacional de 4 horas ininterruptos.

Para este cenário, os centros de resposta que atenderam a restrição de tempo de disponibilização foram as embarcações Santos Supplier e dedicada, e o centro fixo localizado na Base de Arraial do Cabo. Os demais centros não atenderam à restrição legal (6 horas para disponibilização dos recursos no local) e, portanto, não puderam enviar equipamentos de resposta. Este resultado se refere para ambas as estações do ano.

Apesar de atender a restrição de tempo de disponibilização de resposta, a embarcação Santos Supplier não foi selecionada na solução do modelo para atender ao derramamento; apenas a embarcação dedicada e o centro fixo de Arraial do Cabo podem enviar equipamentos (Tabela 3). Isto ocorre porque a embarcação Santos Supplier não tem disponível o equipamento Carretel inflável de 400 metros demandado, nem o recolhedor de 350 m<sup>3</sup>/h.

Tabela 3: Resultado  $x_{ie}$  para cenário de derramamento médio. CI 400m = carretel inflável de 400 m; CA 250m = carretel airfence 250 m; CA 300m = carretel airfence de 300 m; CI 300m = carretel inflável de 300m; BPIM = barreira de proteção de áreas inter-marés; R350 = recolhedor de 350 m<sup>3</sup>/h; R250 = recolhedor de 250 m<sup>3</sup>/h; R130 = recolhedor de 130 m<sup>3</sup>/h.

<b>Centro de resposta/Equipamento</b>	<b>CI 400m</b>	<b>CA 250m</b>	<b>CA 300m</b>	<b>CI300</b>	<b>BPIM</b>	<b>R350</b>	<b>R250</b>	<b>R130</b>
Embarcação Thor Supplier	0	0	0	0	0	0	0	0
Embarcação Campos Captain	0	0	0	0	0	0	0	0
Embarcação Santos Supplier	0	0	0	0	0	0	0	0
Embarcação dedicada	1	0	0	0	0	1	0	0
Base Rio de Janeiro	0	0	0	0	0	0	0	0
Base Arraial do Cabo	0	0	0	0	0	0	1	0
Base Santos	0	0	0	0	0	0	0	0
Base Itajaí	0	0	0	0	0	0	0	0

Neste caso, recolheu-se um total de 480 m<sup>3</sup> de óleo em quatro horas e, assumindo-se que em casos reais em que há ação intempélica sobre o óleo, pode-se constatar que a resposta foi eficiente, já que 96% do volume do óleo foram recolhidos. Os custos associados a esta resposta compreende um valor total de R\$ 10.220,00/dia, sendo que 7,71 % destes custos contemplam a parte logística e 92,29% à parte operacional.

Com o intuito de averiguar a alteração sobre o nível estratégico, alterou-se o número de recursos disponíveis nos centros de resposta. Assumiu-se que a embarcação dedicada dispusesse de uma unidade de recolhedor de 250 m<sup>3</sup>/h, ao invés de não ter disponível este equipamento, como se verifica na solução inicial. Além disso, o valor do SDC da EOR é igual a uma unidade.

Como era de se esperar, o resultado foi alterado para  $x_{ie}$ ; apenas a embarcação dedicada despachou equipamentos para o local do acidente, reduzindo os custos logísticos em aproximadamente 73%. Assim, o custo total da operação foi de R\$ 9.637,00/dia, ao invés de R\$ 10.220,00/dia como na solução inicial. O volume recuperado se manteve o mesmo (480 m<sup>3</sup>).

Esta análise demonstra que o nível estratégico poderia ser aperfeiçoado, uma vez que o mesmo benefício é alcançado (recupera-se o mesmo volume de óleo) a um custo menor, se a embarcação dedicada tivesse mais recursos a bordo.

A avaliação na disposição a pagar da EOR é refletida da alteração do coeficiente SDC; quanto maior este valor, mais equipamentos serão despachados para recolher um volume maior de óleo. Por outro lado, quanto menor o valor deste coeficiente, uma quantidade menor de equipamentos serão enviados para o recolhimento do óleo derramado e, conseqüentemente, menor será o custo da operação.

Como se observa na Figura 2, o comportamento da resposta é similar tanto no verão, quanto no inverno. A diferença reside no valor do benefício da resposta, uma vez que em casos de acidentes no inverno, a maior probabilidade do óleo atingir a costa faz com que a recuperação do óleo nesta estação do ano evite que importantes ecossistemas sejam contaminados.



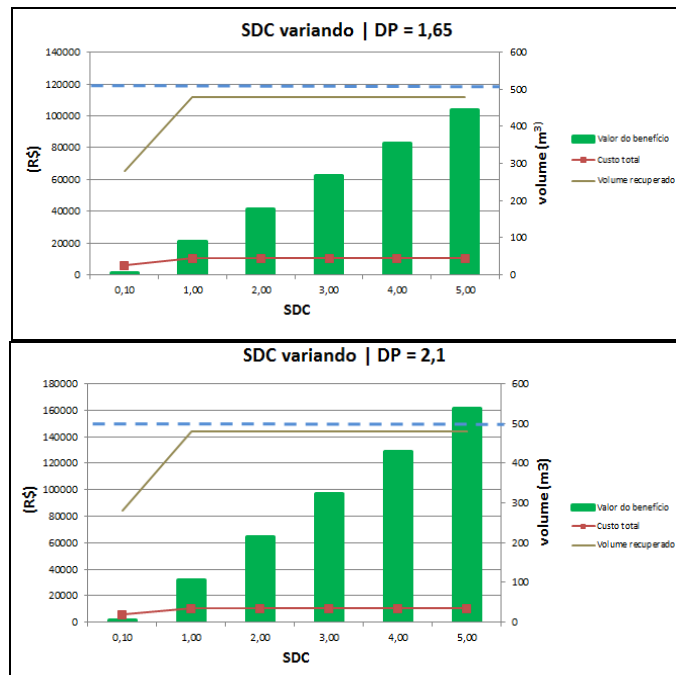


Figura 2: Comportamento do custo-benefício para o cenário de verão (acima - DP=1,65) e inverno (abaixo - DP = 2,1) para o cenário de derramamento médio. A linha azul tracejada representa o volume ( $m^3$ ) de óleo vazado por dia.

Para valores de  $SDC \geq 1$ , os mesmos equipamentos seriam enviados, recuperando um volume de  $480 m^3$ /dia de óleo do mar (96% do volume de óleo). Para este tipo de resposta, ter-se-ia um custo total de R\$ 10.220,00/dia.

Este resultado mostra que, teoricamente, o recolhimento do óleo poderia trazer mais benefícios, tal como se observa na Figura 2, já que se estimou um vazamento máximo diário de  $500 m^3$ . No entanto, como foi comentando anteriormente, a ação intempélica atua na limpeza do óleo no mar, essencialmente pelos processos de evaporação logo nas primeiras horas após derramamento.

Para  $SDC = 0,1$ , ou seja, menos equipamentos seriam enviados e consequentemente reduziria o benefício da resposta, recolhendo apenas  $280 m^3$  ou 56% do volume de óleo derramado. Os custos associados a este tipo de resposta seria de R\$ 5.786,00/dia, quase metade do custo para  $SDC \geq 1$ . A redução no valor do custo é devido ao não acionamento do centro de resposta Arraial do Cabo.

O comportamento ideal da EOR seria aquele em que a disposição em amenizar os impactos causados pelo incidente seria o mesmo dado ao reduzir os custos totais da operação.

Uma equipe de resposta que despachasse uma quantidade superior de recursos àquela dada pelo resultado de  $SDC = 1$  (Figura 2) elevariam os custos totais da operação sem necessidade. Por outro lado, uma equipe cujo comportamento seria influenciado apenas pela redução dos custos totais da operação, em detrimento à disposição em amenizar os impactos, diminuiria o benefício da resposta ao recuperar um volume menor de óleo derramado.

### 3.1.2. Cenário extremo

Para este cenário, assume-se o afundamento da unidade de produção, liberando um volume total de óleo de  $231.675,5 m^3$  ou  $10.069,9 m^3/h$ . O tempo de trabalho operacional considerado foi de 10 horas/dia ininterruptas e o valor de  $SDC = 1$ . Todos os centros de resposta estão aptos a serem acionados, uma vez que nenhum deles viola a restrição de tempo máximo de disponibilização de recursos (72 horas).

Como se verifica na Tabela 4, todos os centros são acionados, dos quais são alocados todos os recolhedores disponíveis para o atendimento ao incidente. No entanto, o volume recuperado é de apenas 6720 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 2,9% do volume total vazado. O custo desta resposta é de R\$ 144.957,00/dia.

Tabela 4: Resultado  $x_{ie}$  para o cenário de derramamento extremo com 10 horas de trabalho e SDC = 1. CI 400m = Carretel inflável de 400 m; CA 250M = Carretel Airfence 250 m; CA 300m = Carretel Airfence de 300 m; CI 300m = Carretel Inflável de 300m; BPIM = Barreira de Proteção de áreas inter-marés; R350 = Recolhedor de 350 m<sup>3</sup>/h; R250 = Recolhedor de 250 m<sup>3</sup>/h; R130 = Recolhedor de 130 m<sup>3</sup>/h.

Centro de resposta/Equipamento	CI 400m	CA 250m	CA 300m	CI300	BPIM	R350	R250	R130
<b>Embarcação Thor Supplier</b>	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>Embarcação Campos Captain</b>	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>Embarcação Santos Supplier</b>	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>Embarcação dedicada</b>	1	0	0	0	0	1	0	0
<b>Base Rio de Janeiro</b>	0	0	0	4	0	0	2	2
<b>Base Arraial do Cabo</b>	0	0	0	0	0	0	2	0
<b>Base Santos</b>	0	0	0	0	0	0	2	0
<b>Base Itajaí</b>	0	0	0	0	0	0	2	0

De forma a atingir um recolhimento de pelo menos 90% do volume total do óleo vazado, alterou-se o número de recolhedores disponíveis em todos os centros de resposta, mantendo-se SDC = 1. A Tabela 5 mostra o resultado em que 96 % do volume vazado é recuperado, considerando-se um tempo operacional de trabalho de 10 horas.

Tabela 5: Resultado  $x_{ie}$  no verão e no inverno, para o cenário de volume de derramamento extremo com 10 horas de trabalho e SDC = 1, alterando-se o  $N_{ie}$ . CI 400m = Carretel inflável de 400 m; CA 250M = Carretel Airfence 250 m; CA 300m = Carretel Airfence de 300 m; CI 300m = Carretel Inflável de 300m; BPIM = Barreira de Proteção de áreas inter-marés; R350 = Recolhedor de 350 m<sup>3</sup>/h; R250 = Recolhedor de 250 m<sup>3</sup>/h; R130 = Recolhedor de 130 m<sup>3</sup>/h.

Centro de resposta/Equipamento	CI 400m	CA 250m	CA 300m	CI300	BPIM	R350	R250	R130
<b>Embarcação Thor Supplier</b>	0	0	0	0	0	10	10	10
<b>Embarcação Campos Captain</b>	0	0	0	0	0	10	10	10
<b>Embarcação Santos Supplier</b>	0	0	0	0	0	10	10	10
<b>Embarcação dedicada</b>	1	0	0	0	0	10	10	10
<b>Base Rio de Janeiro</b>	0	0	0	4	0	28	28	28
<b>Base Arraial do Cabo</b>	0	0	0	0	0	28	28	28
<b>Base Santos</b>	0	0	0	0	0	28	28	28
<b>Base Itajaí</b>	0	0	0	0	0	28	28	28

Para tanto, os centros de respostas teriam que apresentar um número maior de recolhedores para atender a um derramamento de óleo com esta demanda. Além de elevar os custos do nível tático, os custos associados ao planejamento estratégico também seriam maiores. Observa-se que, mesmo com uma pequena probabilidade de ocorrer um acidente desta magnitude, o atual Plano de Emergência Individual (PEI) do empreendimento certamente não está dimensionado para atender um derramamento deste nível com seus recursos próprios, uma vez que há carência de recolhedores para recuperar o óleo vazado. Outras medidas teriam que ser adotadas, tal como acionar outros centros de respostas não contemplados pelo PEI deste empreendimento.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo de decisão para atendimento emergencial a derramamento de óleo no ambiente marinho e foi aplicado na Bacia de Campos (RJ), o problema é formulado como um modelo de programação linear inteira. O modelo tem o objetivo de encontrar o melhor custo-benefício de um derramamento de petróleo específico. O custo da resposta é constituído pelo custo operacional e o pelo custo logístico. O benefício do atendimento, por sua vez, é constituído pela limpeza do óleo no mar, evitando que o poluente permaneça no ambiente marinho.

Os cenários analisados foram escolhidos em função do volume de petróleo derramado: (i) cenário médio  $\approx 500 \text{ m}^3/\text{dia}$  e (ii) cenário extremo - que representa o afundamento da unidade de produção  $\approx 231.675,5 \text{ m}^3$ .

No cenário médio, praticamente todo o óleo vazado foi recuperado ( $480 \text{ m}^3$ ) com quatro horas de trabalho a um custo de R\$ 10.220/dia. No cenário extremo, no entanto, a recuperação do óleo diminuiu drasticamente, mesmo trabalhando-se durante 10 horas diárias ininterruptas, apenas 2,9% do óleo é recuperado em 10 horas de trabalho contínuo a um custo de R\$ 144.957,00/dia. Para todos esses resultados, não houve variação para as duas estações do ano consideradas (verão e inverno).

Através da análise de sensibilidade de quantidade de recursos disponíveis para o atendimento emergencial ao derramamento de óleo, a atual estrutura do PEI do empreendimento não é capaz de cobrir o pior caso de derramamento com recursos próprios.

Analisando a resposta ao derramamento através da variação do parâmetro SDC, notou-se falhas no nível estratégico do problema de derramamento de óleo. Se mais recursos estivessem disponíveis nos centros de resposta para diferentes comportamentos da EOR, o benefício da resposta seria melhor, ou seja, um volume maior de óleo seria recuperado. Para valores de  $\text{SDC} = 0,1$ , ou seja, a EOR se mostrasse menos propensa a amenizar os impactos, a redução dos custos da operação seria na ordem de 50% do total, no entanto, apenas 1,2 % do volume seriam recuperados diariamente.

Verificando-se o outro extremo, notou-se que apesar da EOR adotar um  $\text{SDC} = 5$ , ou seja, a disposição de reduzir os impactos é cinco vezes maior em relação aos custos associados à operação, não seria suficiente para recuperar todo o óleo vazado no cenário extremo de derramamento. Portanto, outras medidas de eficiência teriam que ser adotadas para potencializar a recuperação do óleo. Para o nível estratégico, por exemplo, uma alternativa seria adquirir equipamentos com uma capacidade nominal de recuperação de óleo maior e/ou disponibilizar mais equipamentos de limpeza de óleo. Para o nível operacional, por sua vez, aumentar o número de horas trabalhadas, conforme as possibilidades das condições meteo-ocenográficas.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AECOM. **Desenvolvimento e escoamento da produção de petróleo, Bloco BM-C-39 e Bloco BM-C-40**, Bacia de Campos. In: Estudo de Impacto Ambiental, Rio de Janeiro, 2011.
- [2] Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. Anuário Estatístico, 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=66833>>. Acesso em: 02 janeiro 2014.

- [3] BROWNER, C. **Assessora de Energia da Casa Branca**. O Globo, 2010. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2010/05/vazamento-no-golfo-do-mexico.html>>. Acesso em: 19 Novembro 2012.
- [4] CALIXTO, E., 2011. **Contribuições para Plano de Contingência para derramamento de Petróleo e derivados no Brasil**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [5] CANELAS, A. L. S, 2007. **Evolução da importância econômica da indústria de petróleo e gás natural no Brasil: contribuição a variáveis macroeconômicas**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFR, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [6] CHARNES, A. COOPER, W., KARWAN, K., et al. "A chance constrained goal programming model to evaluate response resources for marine pollution disasters". **Journal of Environmental Economics and Management**, nº 6, pp. 234 – 244, 1979.
- [7] Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**, 2007. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080111\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf)>. Acesso em: 03 dezembro 2013.
- [8] GKONIS, K. G., VENTIKOS, N. P., PSARAFTIS, H. N., *et al.* "A model-based approach for tactical decision making in oil spill response". **International Symposium on Ship Operations, Management and Economics**, v. 2, pp 1 – 14, 2008.
- [9] IAKOVOU, E., CHI, M., DOULIGERIS, C., *et al.* "Optimal location and capacity of emergency cleanup equipment for oil spill response". **European Journal of Operation Research**, v. 96, pp. 72 - 80, 1996.
- [10] PSARAFTIS, H. N.; ZIOGAS, B. O. "A tactical decision algorithm for the optimal dispatching of oil spill cleanup equipment". **Management Science**, v. 31, pp. 1475 - 1491, 1985.
- [11] PSARAFTIS, H., THARAKAN, G., CEDER, A. 1996. "Optimal response to oil spills: the strategic decision case". **Operational Research**, v. 34, nº 2, pp. 203 – 217.
- [12] REDONDO, J. M. PLATANOV, A. K. Self similar distribution of oil spills in European coastal waters. **Environmental Research Letters**, pp. 1 – 10, 2009.
- [13] SRINIVASA, A; WILHELM, W. "A procedure for Optimizing Tactil Response in Oil Spill Clean Up Operation". **European Journal of Operational Research**, nº 102, pp. 554 – 574, 1997.