

OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RESPOSTA A  
DERRAMAMENTOS DE ÓLEO PARA PERFURAÇÕES PETROLÍFERAS  
EM ÁREAS AMBIENTALMENTE SENSÍVEIS - UM ESTUDO DE CASO NO  
BLOCO BM-CAL-4 NA BACIA DE CAMAMU/ALMADA – BAHIA

Samuel Barreto da Cunha

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

---

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

---

Prof. Rogério de Aragão Bastos do Valle, D.Sc.

---

Prof. Álvaro Souza Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2008

CUNHA, SAMUEL BARRETO DA

Otimização na alocação de recursos de resposta a derramamentos de óleo para perfurações petrolíferas em áreas ambientalmente sensíveis – um estudo de caso no Bloco BM-CAL-4 na Bacia de Camamu/Almada – Bahia [Rio de Janeiro] 2007

VI, 82 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Produção, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ-

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me acompanharam e incentivaram em tudo que já fiz na vida.*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer àqueles que diretamente ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho, em especial:

- A Deus, por tudo.
- Ao meu orientador, Virgílio Ferreira Filho, por todo apoio, orientação, incentivo e ajuda durante esse processo.
- Ao brilhante amigo Luiz Rodolfo Costa, pela ajuda que tornou esse trabalho possível.
- Aos grandes amigos que fiz durante o mestrado: Luciana, Wagner, Renato, Débora e Victor, pelas noites e intermináveis fins de semana dedicados ao estudo.
- A secretária do Departamento de Pesquisa Operacional, Andréia Lima da Silva Moreira, pela ajuda em todos os momentos.
- A Esso, Devon, El Paso, Hidroclean e Kitéria, pelo suporte imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao amigo Fernando Borensztein, pelo exemplo de profissionalismo e competência.
- A Fernanda Menezes Martins Silva, pelo amor que me estimulou no final da elaboração desta dissertação.
- Aos meus pais, Guilhermino e Héliida, por todo o amor e incentivo que sempre me deram em toda a minha vida e que me tornaram a pessoa que eu sou hoje.
- As minhas irmãs, Liliane e Viviane, e aos meus sobrinhos, Guilherme, Beatriz e Gabriel, pelo apoio e amizade em todos os aspectos da minha vida.

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

OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE RECURSOS DE RESPOSTA A  
DERRAMAMENTOS DE ÓLEO PARA PERFURAÇÕES PETROLÍFERAS  
EM ÁREAS SENSÍVEIS - UM ESTUDO DE CASO NO BLOCO BM-CAL-4 NA  
BACIA DE CAMAMU/ALMADA – BAHIA

Samuel Barreto da Cunha

Janeiro/2008

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Este trabalho utiliza um modelo de otimização mista inteira para a reavaliação da alocação de recursos de resposta a derramamentos de óleo minimizando o custo total associado ao armazenamento e a operação, assegurando o cumprimento de demandas de equipamentos de resposta e de tempos de resposta associados ao plano de contingência de um projeto de perfuração petrolífera exploratória no Sul do Estado da Bahia, na Bacia de Camamu-Almada, próximo a áreas ambientalmente sensíveis.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

OPTIMIZATION ON THE ALLOCATION OF OIL SPILL  
RESPONSE EQUIPMENT FOR EXPLORATORY OIL DRILLING IN SENSITIVE  
AREAS – A CASE STUDY IN THE BM-CAL-4 BLOCK IN THE  
CAMAMU/ALMADA BASIN – BAHIA

Samuel Barreto da Cunha

January/2008

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

This work applies a mixed-integer optimization model for the allocation of oil spill response equipment minimizing the total associated cost of storing, and operation, ensuring compliance with the equipment demands and response time constraints associated with the contingency plan for drilling an exploratory petroleum well in the South of Bahia, in the Camamu-Almada Basin, close to environmentally sensitive areas.

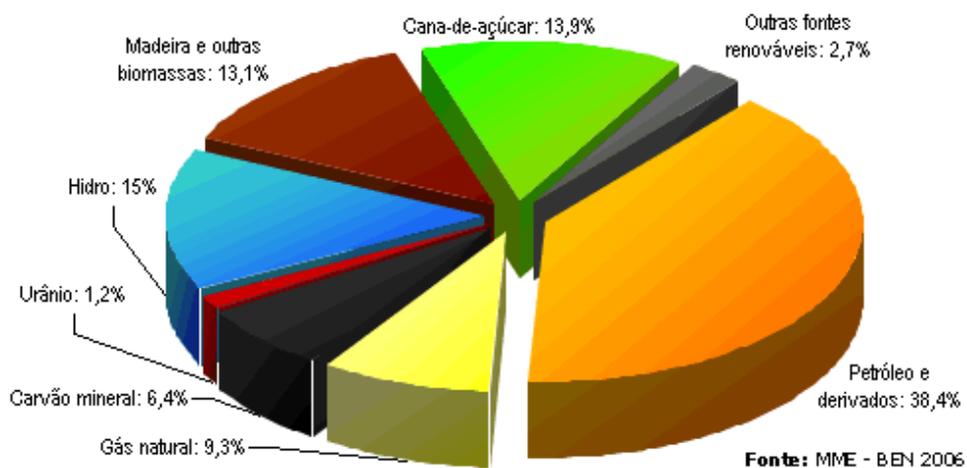
## ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – CONDICIONANTE DA RESPOSTA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO MAR.....	9
2.1. Comportamento do Óleo Derramado na Água.....	9
2.1.1. Propriedades do Óleo.....	9
2.1.2. Intemperismos Naturais do Óleo Derramado no Mar.....	10
2.1.2.1. Espalhamento do Óleo.....	11
2.1.2.2. Evaporação.....	12
2.1.2.3. Dispersão Natural.....	12
2.1.2.4. Emulsão de Óleo e Água.....	13
2.1.2.5. Outros Processos.....	13
2.1.3. Movimento da Mancha de Óleo.....	14
2.1.4. Ação Combinada dos Processos.....	15
2.2. Opções de Resposta e suas Limitações.....	16
2.2.1. Contenção e Recolhimento.....	18
2.2.1.1. Barreiras de Contenção.....	19
2.2.1.2. Equipamentos de Recolhimento – Skimmers.....	21
2.2.1.3. Armazenamento Temporário.....	22
2.2.1.4. Absorventes.....	23
2.2.2. Dispersão Química.....	24
2.2.2.1. Técnicas de Aplicação de Dispersantes.....	24
2.2.3. Limpeza de Praia.....	25
2.2.3.1. Métodos de Limpeza de Praia.....	26
2.3. Legislação.....	27
2.3.1. Legislação Internacional.....	27
2.3.2. Legislação Nacional.....	28
2.3.2.1. Resolução CONAMA 265 e Lei 9.966.....	30
2.3.2.2. Plano de Emergência Individual (PEI) - Resolução CONAMA 293.....	30
2.3.3. O Licenciamento Ambiental.....	33
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE PROBLEMAS RELACIONADOS A DERRAMAMENTO DE ÓLEO COM ENFOQUE DE OTIMIZAÇÃO.....	36

3.1. Modelos Estratégicos / Táticos / Operacionais.....	36
3.2. Abordagem de Otimização .....	37
3.2.1. Modelos Estratégicos de Otimização Relacionados à Resposta ao Derramamento de Óleo.....	37
3.2.1.1. O Modelo de Charnes, Harrald, Karwan e Wallace .....	39
3.2.1.2. O Modelo de Charnes, Cooper e Wallace .....	39
3.2.1.3. O Modelo de Belardo, Harrald e Wallace .....	40
3.2.1.4. O Modelo de Psaraftis, Tharakan e Ceder .....	41
3.2.1.5. O Modelo de Ceder, Tharakan e Psaraftis.....	42
3.2.1.6. O Modelo de Iakavou, Douligieris e Korde.....	42
3.2.1.7. O Modelo de Srinivasa e Wilhelm .....	43
3.2.1.8. O Modelo de Costa e Ferreira Filho .....	43
3.2.1.8.1. Formulação do Modelo.....	44
4 – ESTUDO DE CASO DO PROJETO DE PERFURAÇÃO NA BACIA DE CAMAMU-ALMADA.....	50
4.1. Contextualização do Estudo de Caso .....	50
4.1.1. Caracterização Ambiental da Área.....	52
4.2. O Plano de Emergência Individual Aprovado para o Projeto BM-CAL-4 .....	54
4.3. Modelo Proposto por Iakovou, Ip, Douligieris e Korde (1996). .....	60
4.3.1. Objetivo e Hipóteses Fundamentais. ....	60
4.3.2. Formulação do Modelo.....	61
4.3.3. Aplicação do Modelo e Técnica de Solução Proposta pelos autores. ....	64
4.4. Adaptação do Modelo para Aplicação no Projeto BM-CAL-4 .....	64
4.4.1. Informações de Entrada do Modelo .....	67
4.5. Resultados.....	71
4.6. Análise de Sensibilidade.....	76
5 – CONCLUSÕES.....	79
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## 1 – INTRODUÇÃO

No ano de 2006, o Brasil atingiu a importante marca de tornar-se auto-suficiente na produção de petróleo. Um marco muito importante, visto que 54,1% da energia consumida no Brasil são provenientes do petróleo, gás natural e carvão mineral (Ministério de Minas e Energia, Agosto/2007), como podemos ver na Figura 1.1 que mostra a matriz energética brasileira.



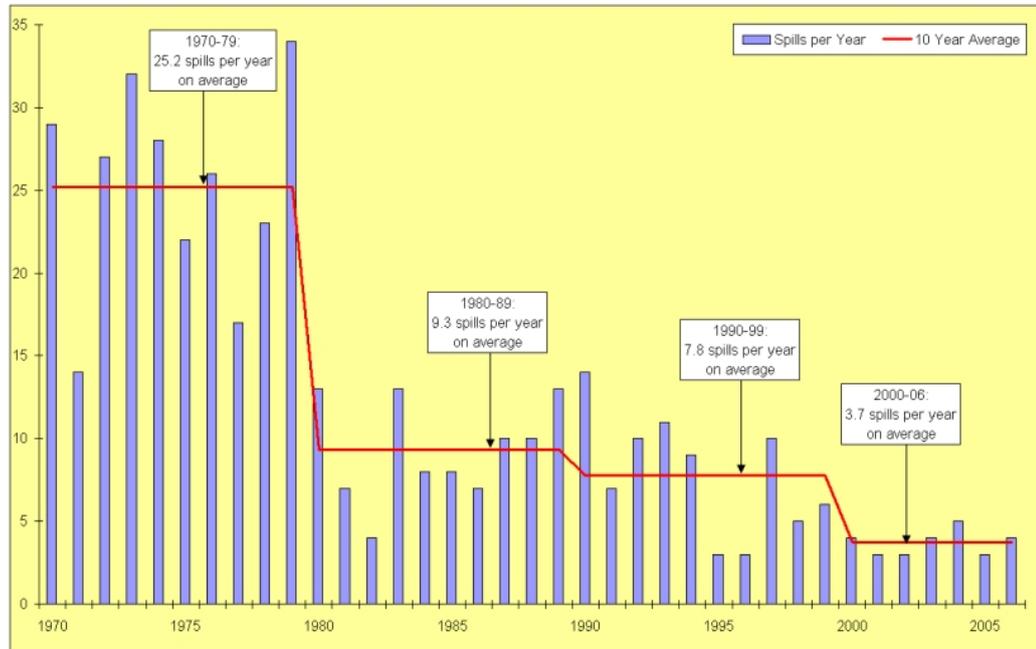
**Figura 1.1 – Matriz energética do Brasil – 2005 (Ministério de Minas e Energia – Ago/2007)**

Do petróleo produzido no Brasil, mais de 85% são produzidos a partir de reservatórios localizados sob o mar. Isso significa que um volume aproximado de 1,3 milhões de barris equivalentes de petróleo em média são extraídos e transportados diariamente ao longo de toda extensão da costa brasileira.

O litoral brasileiro tem diversas atividades econômicas que poderiam ser diretamente afetadas por um eventual derramamento acidental de óleo no mar, como o turismo e a pesca. Além deste aspecto social, temos também o aspecto ambiental, pois o ecossistema marinho existente é muito diverso de importância e sensibilidade variadas.

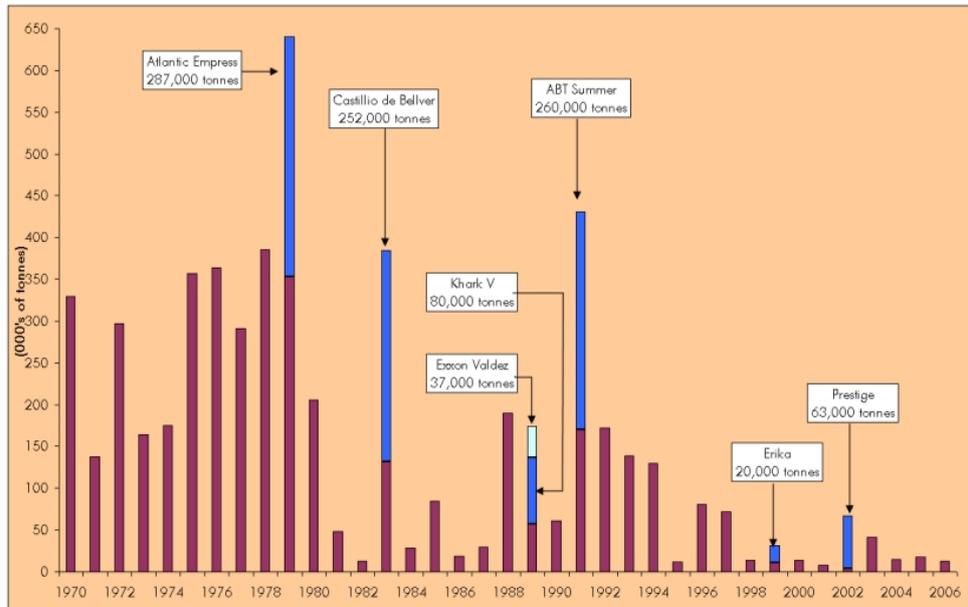
Para compreender a probabilidade de acontecimentos deste tipo, ao se observar o histórico do problema de derramamento de óleo no mar no mundo nota-se que o número de eventos e a magnitude dos mesmos estão diminuindo significativamente ao longo dos anos, como mostra a Figura 1.2. Isso se deve à

melhoria das tecnologias prevencionistas (como navios petroleiros de casco duplo, técnicas de controle de poço e outras). Muitas dessas melhorias são frutos de novas exigências governamentais ou virtude das políticas ambientais das próprias empresas.



**Figura 1.2: Número de derramamentos com mais do que 700 toneladas  
(International Tanker Owner Pollution Federation - Ago/2007)**

Em contrapartida, de fácil percepção, mas de difícil quantificação, a importância dada pelos governos e pela opinião pública aos impactos gerados por derramamentos de óleo cresceu também significativamente. O impacto ambiental de um derramamento de óleo não tem uma relação direta com o volume derramado e sim com as áreas sensíveis que ele atinge. Como podemos observar na Figura 1.3, que mostra o volume de óleo derramado por ano, analisando especificamente o ano de 1989, percebemos que o desastre do navio petroleiro Exxon Valdez na Costa do Alasca teve menos do que a metade do volume derramado pelo navio petroleiro Khark V que adernou na a 120 milhas nauticas da costa atlântica do Marrocos, sendo que o primeiro é tido como um símbolo dos desastres associados a derramamentos de óleo e o segundo é lembrado por poucos.



**Figura 1.3: Quantidade de óleo derramado  
(Internation Tanker Owners Pollution Federation – Ago/2007)**

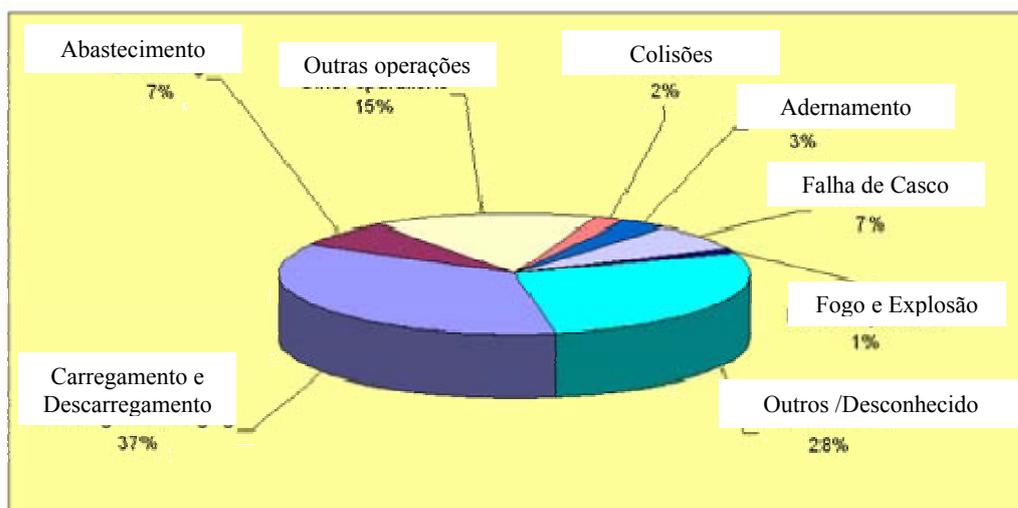
O derramamento do petroleiro Exxon Valdez, apesar de ser o 35º maior em volume já registrado na história (Internation Tanker Owners Pollution Federation – Ago/2007), teve repercussão muito maior do que outros de volume muito maior, mas que não atingiram regiões costeiras ou áreas sensíveis. Esse derramamento atraiu fortemente o interesse da imprensa por ser até então o maior derramamento ocorrido em águas americanas e ter ocorrido em uma área de grande importância na atividade pesqueira, com grande diversidade ambiental incluindo diversas espécies ameaçadas de extinção, como a águia de cabeça pelada. Nesse caso, o custo envolvido na resposta foi o maior da história, sendo, no primeiro ano somente, de mais do que 2 bilhões de dólares, não incluídas as multas e compensações pagas em ações judiciais que se prolongam até os dias de hoje.

De maneira geral, segundo a INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION – IMO (2005), os custos de resposta somente, incluindo remediação mas não multas, variam de aproximadamente US\$ 650/tonelada a próximo de US\$ 650.000/tonelada. Essa variância se deve, principalmente, pelas áreas atingidas pelo óleo derramado.

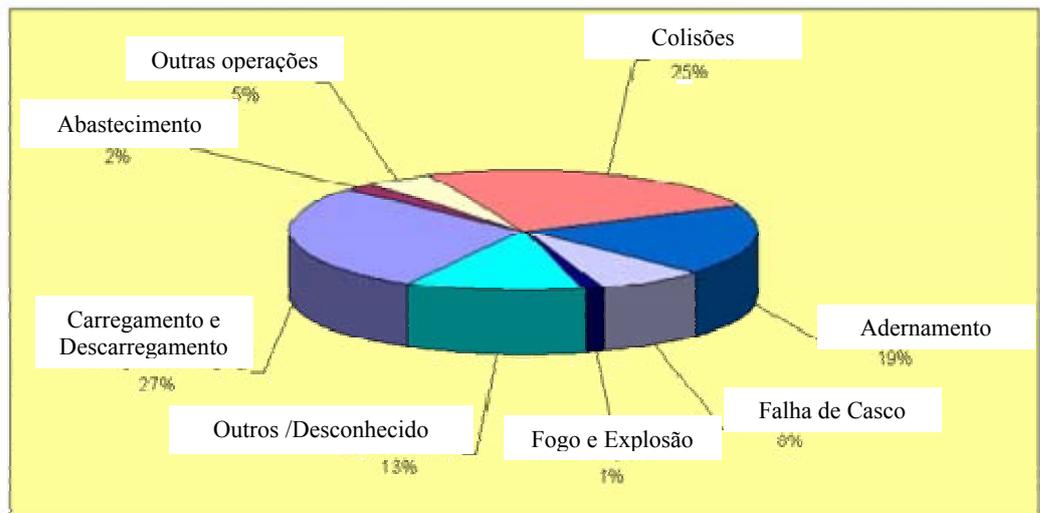
Outro aspecto importante a ser considerado na análise dos derramamentos são as possíveis causas dos mesmos, como podemos observar na Tabela 1.1.

OPERAÇÕES	< 7 toneladas	7-700 toneladas	> 700 toneladas	Total
Carregamento e descarregamento	2821	332	30	3183
Abastecimento	548	26	0	574
Outras Operações	1178	56	1	1235
ACIDENTES				
Colisões	173	296	97	566
Adernamento	235	222	118	575
Falhas de Casco	576	90	43	709
Fogo e Explosão	88	15	30	133
Outras / Desconhecidas	2181	148	24	2353
TOTAL	7800	1185	343	9328

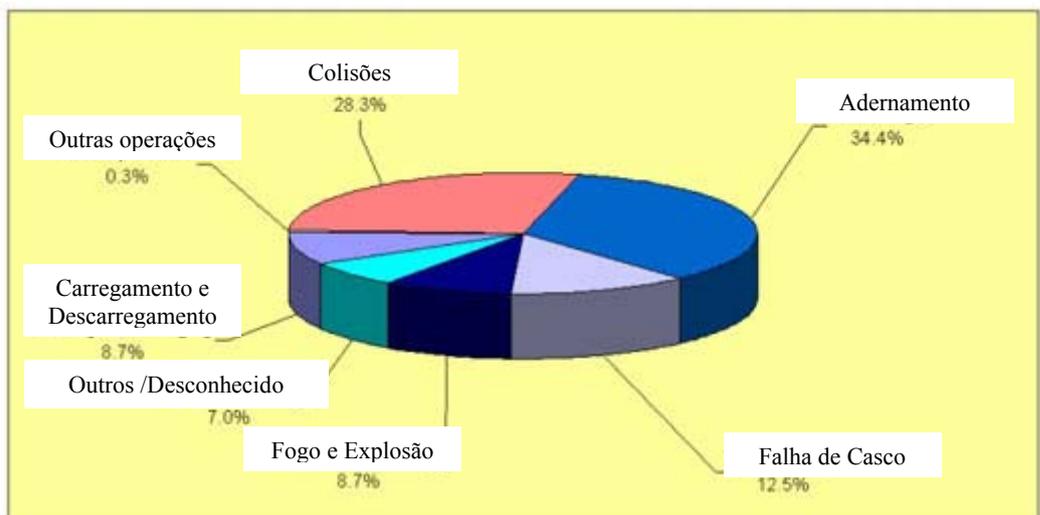
**Tabela 1.1: Derramamento por causa, 1974-2006**  
(International Tankers Owners Pollution Federation – Ago/2007)



**Figura 1.4: Derramamentos de óleo no mar <7 ton por causa, 1974-2006**  
(International Tankers Owners Pollution Federation – Ago/2007)



**Figura 1.5: Derramamentos de óleo no mar 7-700 ton por causa, 1974-2006**  
(International Tankers Owners Pollution Federation – Ago/2007)



**Figura 1.6: Derramamentos de oleo no mar >700 ton por causa, 1974-2006**  
(International Tankers Owners Pollution Federation – Ago/2007)

Analisando a Tabela 1.1 e as Figuras 1.4, 1.5 e 1.6, observa-se que:

- A maioria dos derramamentos de óleo no mar de pequena monta (menores que 7 toneladas), resultam de operações rotineiras como carregamento, descarregamento e abastecimento (que normalmente ocorrem em portos, terminais, ou plataformas relativamente próximos a costa).
- A maioria dos derramamentos operacionais é de pequena monta (aproximadamente 91% de menos do que 7 toneladas);

- Causas acidentais como colisões e adernamentos geralmente causam acidentes de maior monta com pelo menos 84% dos incidentes envolvendo quantidades maiores do que 700 toneladas de óleo sendo atribuídas a esses fatores.

De maneira resumida, de acordo com a análise das estatísticas apresentadas, a maior probabilidade de ocorrências de derramamento de óleo no mar se dá próximo à costa, assim como aquelas de maior severidade, principalmente aquelas que ocorrerem em áreas sensíveis.

Uma vez que os derramamentos, por análise histórica, são inevitáveis, e os custos de reparação elevados, responder a eles de maneira eficaz é muito importante. Se respondidos eficientemente, o impacto ambiental e, por consequência, os custos associados a remediações serão reduzidos, além de minimizar os impactos negativos associados ao nome da empresa cujo óleo foi derramado, por demonstrar presteza e diligência.

O problema de resposta a derramamentos de óleo no mar é complexo e pode ser estruturado nos níveis estratégico, tático e operacional. As decisões tomadas em um nível superior serão restrições para os problemas formulados no nível inferior.

Para o problema de derramamento de óleo no mar sob o enfoque estratégico são consideradas as decisões relacionadas ao investimento e ao planejamento de longo prazo, ou seja, relacionadas a futuros derramamentos possíveis de ocorrer, sendo então determinados os tipos e as quantidades de equipamentos necessários e os locais mais adequados para armazená-los de maneira que se tenha uma capacidade adequada para uma ampla faixa de potenciais derramamentos de óleo que possam vir a ocorrer ao longo de um horizonte de tempo especificado. Um dos requisitos que direcionará o posicionamento destes equipamentos é o atendimento do tempo máximo de resposta requerido para cada um dos cenários de derramamentos identificados.

Os níveis tático e operacional dizem respeito às decisões a serem tomadas após a ocorrência do acidente. No nível tático são tratadas as decisões relacionadas à resposta a um acidente específico de derramamento

de óleo, definindo-se para este o número e tipo de equipamentos que serão alocados à cena no início do acidente e durante o seu andamento. O problema tático assume que o problema estratégico tenha sido resolvido, uma vez que decisões no nível tático utilizarão os equipamentos que foram disponibilizados no plano estratégico.

O nível operacional está relacionado com o uso dos equipamentos uma vez que estes tenham chegado à cena do acidente. Nele são examinadas com muito mais detalhe as ações que devem ser tomadas durante o acidente, qual a configuração geométrica adequada aos equipamentos ou qual a alocação espacial dos equipamentos de resposta/limpeza. Decisões operacionais determinam exatamente como utilizar os sistemas de resposta prescritos pelo nível tático.

Este trabalho pretende aplicar um modelo estratégico de otimização de alocação de recursos de resposta para um projeto de perfuração petrolífera na Bacia de Camamu-Almada no nordeste brasileiro. Ele está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são abordados, de forma sucinta, aspectos relacionados a intemperismo do óleo no mar, movimento da mancha de óleo no mar, impactos ambientais de derramamentos e os métodos e equipamentos de resposta. Trata também da legislação internacional e nacional relacionadas ao tema e apresenta o processo de licenciamento das atividades dessa natureza no qual se define e aprova o Plano de Emergência Individual (Plano de contingência para derramamentos de óleo) da atividade.

No Capítulo 3 é feita uma revisão da literatura, citando os principais modelos de otimização relacionados a derramamentos de óleo para modelos estratégicos (modelos para resposta e modelos de transporte marítimo). São apresentados também alguns dos modelos clássicos de localização com enfoque de otimização, modelos estes que formam a base dos modelos de otimização tratados neste estudo.

O Capítulo 4 apresenta o modelo proposto por Iakovou, Ip, Douligeris e Korde (1996) e as adaptações no mesmo para considerar Áreas Sensíveis e o

caso específico do projeto de perfuração no Bloco Exploratório BM-CAL-4 e são apresentados os resultados da implementação desse modelo ao caso.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos posteriores no tema.

## **2 – CONDICIONANTE DA RESPOSTA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO MAR**

De forma a estabelecer de maneira objetiva o contexto técnico do problema de derramamento de óleo em estudo, neste capítulo tratamos de forma sucinta as questões do destino do óleo derramado na água, das opções de resposta a esses derramamentos e da legislação associada ao tema que afeta sua abordagem (sejam elas internacionais ou particulares ao Brasil).

### ***2.1. Comportamento do Óleo Derramado na Água***

Para compreender as dificuldades que continuam a desafiar uma solução tecnológica simples para o problema de derramamento de óleo no mar e as diferentes técnicas utilizadas, é necessário examinar-se alguns dos fatores principais que determinam a seriedade de um derramamento. Nesse capítulo trataremos da apresentação do problema de derramamento de óleo no mar.

Quando o óleo é derramado no mar, ele passa por várias mudanças físicas e químicas, algumas das quais podem levar ao desaparecimento do óleo ou a sua maior persistência naquele meio. Apesar de qualquer óleo ser em algum momento assimilado pelo ambiente marinho, o tempo para isto depende das características físicas e químicas do óleo e do processo natural de intemperismo do óleo.

#### ***2.1.1. Propriedades do Óleo***

As propriedades naturais do óleo são muito importantes no estudo deste problema porque influenciam o seu comportamento no mar e sua taxa de dissipação por processos naturais e, por conseguinte as estratégias de resposta a derramamentos do mesmo.

A densidade do óleo determina o quanto o mesmo flutua no mar e influencia assim o seu espalhamento e sua dispersão natural. Pode também ser expressa em termos de volume específico API, relacionado de acordo com a seguinte fórmula:

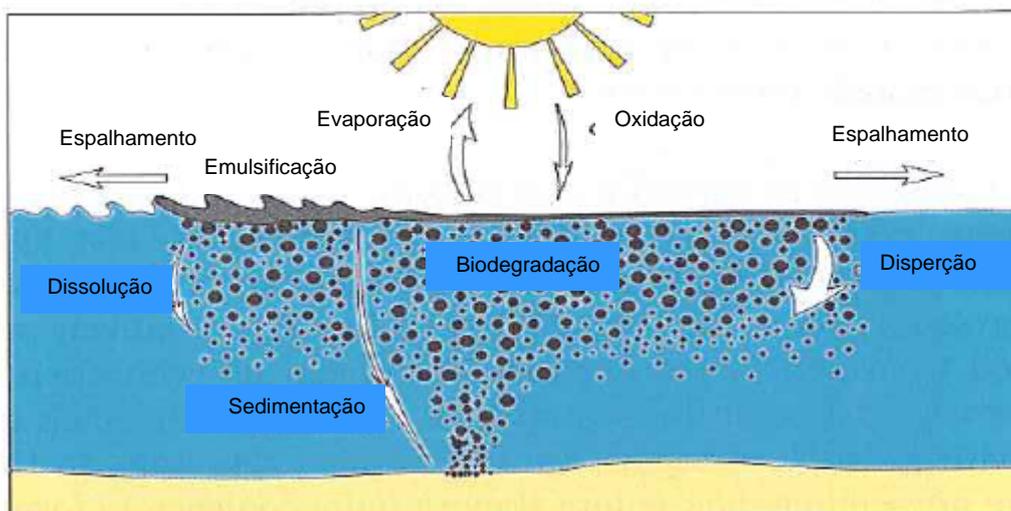
$$\text{API} = 141.5/\text{densidade} - 131.5 \quad (2.1)$$

Como uma regra geral, óleos com baixa densidade (alto grau API) tendem a ter valores menores de viscosidade e contêm grande proporção de componentes voláteis. O ponto de ebulição indica a temperatura na qual o óleo evapora e, por conseguinte, está relacionado a velocidade com que isso acontece no mar. A viscosidade de um óleo determina sua resistência ao escoamento, ou seja, óleos com alta viscosidade escoam com dificuldade. O aumento da temperatura causa a diminuição da viscosidade do óleo, o que explica a influência do sol e da temperatura da água nas características do óleo derramado no mar.

Alguns componentes dos óleos são mais facilmente dispersos na água, principalmente, os componentes mais voláteis. Apesar da dispersão representar um pequeno volume, principalmente se comparado à evaporação, ela pode ser significativa por causar um aumento na toxicidade da água contaminada para vida marinha. A presença de asfaltenos no óleo também é muito importante, pois influenciam a formação de emulsões estáveis de água e óleo.

### ***2.1.2. Intemperismos Naturais do Óleo Derramado no Mar***

O óleo derramado no mar passa por vários processos coletivamente chamados de *intemperismos naturais* que causam uma série de mudanças nas suas características e comportamento, resumidos na Figura 2.1. Analisaremos a seguir cada um desses processos, pois é importante compreender sua influência nas estratégias de resposta e demonstrar a importância de cada processo ao longo do tempo em um derramamento.

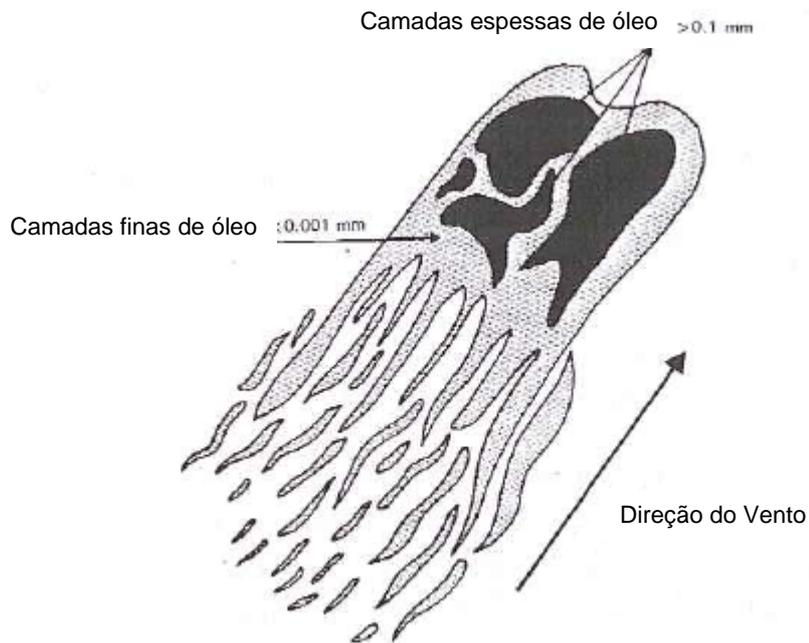


**Figura 2.1 – Intemperismos naturais no óleo derramado na água (IMO, 2005)**

### ***2.1.2.1. Espalhamento do Óleo***

Logo após um derramamento de óleo, o principal processo que ocorre é o seu rápido espalhamento na superfície do mar. Existem muito poucas exceções de óleos muito pesados mais densos do que a água que sedimentam, nos quais a resposta a derramamentos é extremamente difícil e não considerada nesse estudo.

No início do derramamento, esse espalhamento se dá de forma uniforme em uma única mancha. Quanto maior a viscosidade, mais lentamente esse espalhamento se dá. Em poucas horas, a mancha começa a se particionar e forma tiras paralelas à direção do vento. Nesse ponto, a viscosidade do óleo se torna menos importante porque o espalhamento é mais influenciado pela turbulência na superfície do mar. Após 12 horas, o óleo pode estar espalhado em vários quilômetros quadrados, o que limita a efetividade das operações de resposta (IMO, 2005). À medida que o óleo se espalha, existe uma grande variação na espessura da mancha. Pequenas concentrações de maior espessura são frequentemente encontradas cercadas de grandes áreas com espessura bem menor ou até de água limpa.



**Figura 2.2 – Espalhamento do óleo (IMO, 2005)**

#### ***2.1.2.2. Evaporação***

O processo natural mais importante para a retirada do óleo da superfície da água é a evaporação. A velocidade e extensão da evaporação dependem, principalmente, da proporção do óleo derramado que é composta por frações de óleo mais leves. Mas também depende da velocidade do espalhamento do óleo, pois quanto maior a área da superfície, maior a taxa de evaporação. Outros fatores que influenciam a taxa de evaporação são a energia das ondas, a temperatura da água e o vento. Geralmente, os componentes voláteis com ponto de ebulição até 200°C terão evaporado em até 24 horas. Óleos leves como a gasolina e o querosene podem evaporar completamente em poucas horas (IMO, 2005). Óleos mais pesados sofrem muito menos influência deste processo. Uma das conseqüências da evaporação é o aumento da densidade e da viscosidade do óleo residual.

#### ***2.1.2.3. Dispersão Natural***

O óleo derramado no mar, usualmente, se dispersa em gotas sob a ação das condições do mar na camada superior da coluna d'água. Essas gotas permanecem em suspensão na água ou voltam a superfície dependendo da diferença de densidade do óleo e do tamanho das gotas. Essa formação de pequenas gotas aumenta bastante a superfície do óleo exposta à água e, conseqüentemente, à ação natural de micro-organismos. A ação combinada da evaporação e da dispersão natural determina a persistência de um óleo derramado no mar. A dispersão natural reduz o volume do óleo na superfície da água e reduz a perda por evaporação, mas não altera as propriedades física e química do óleo remanescente.

#### ***2.1.2.4. Emulsão de Óleo e Água***

Alguns óleos têm a tendência de adsorver gotas de água e formar uma emulsão de água e óleo. A característica mais comum dessas emulsões é a sua cor alaranjada e consistência como a de um mousse. As condições de mar também podem influenciar a formação de emulsões deste tipo. Em águas mais tranqüilas a emulsificação é menos aparente, mas óleos mais leves podem emulsificar mesmo em condições de mar mais tranqüilas. A viscosidade das emulsões água-óleo é muito maior do que a do óleo que a formou e caso ocorra nessas emulsões a adsorção de partículas sólidas, elas podem sedimentar. A formação dessas emulsões pode aumentar o volume do óleo derramado em até 5 vezes e sua estabilidade depende da composição do óleo e sua temperatura.

#### ***2.1.2.5. Outros Processos***

Vários outros processos, menos significativos que os citados anteriormente na diminuição do volume do óleo derramado no mar, também afetam o seu comportamento na água.

A radiação solar sob o filme de óleo pode promover reações de oxidação que alteram a estrutura das moléculas de hidrocarbonetos no óleo. Alguns componentes do óleo podem sofrer biodegradação por micro-

organismos como bactérias que podem utilizar o óleo como fonte de carbono e energia. A formação de gotas de óleo, por dispersão natural ou química, aumenta a atividade biológica e conseqüentemente a taxa de biodegradação.

Em áreas costeiras, o óleo pode ser carregado por correntes de superfície e ventos para praias ou estuários. Dependendo do perfil da costa, características dos sedimentos/substratos e energia das ondas, o óleo pode ser misturado com os sedimentos da costa.

### **2.1.3. Movimento da Mancha de Óleo**

Uma mancha de óleo derramada no mar raramente mantém a sua posição, tendendo a mover-se sob a influência combinada do vento, ondas e correntes. O movimento da água na superfície é de difícil previsão devido a grande variedade de parâmetros envolvidos, entretanto, se conhecido, algumas características gerais da movimentação do óleo derramado no mar podem ser previstas. Geralmente, o óleo sob a ação do vento se move a 3% da velocidade do vento medido a 10 metros da superfície da água e, se não houver a ação do vento, o movimento da mancha de óleo se dá exclusivamente pelas correntes de superfície (NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES, 2003). Logo, tendo determinado a velocidade do vento e a corrente de superfície, o movimento da mancha de óleo pode ser estimado por uma soma de vetores representadas na Figura 2.3 e expressa pela seguinte fórmula:

$$V_{\text{óleo}} = V_{\text{corrente}} + V_{\text{vento}} \times 3\% \quad (2.2)$$

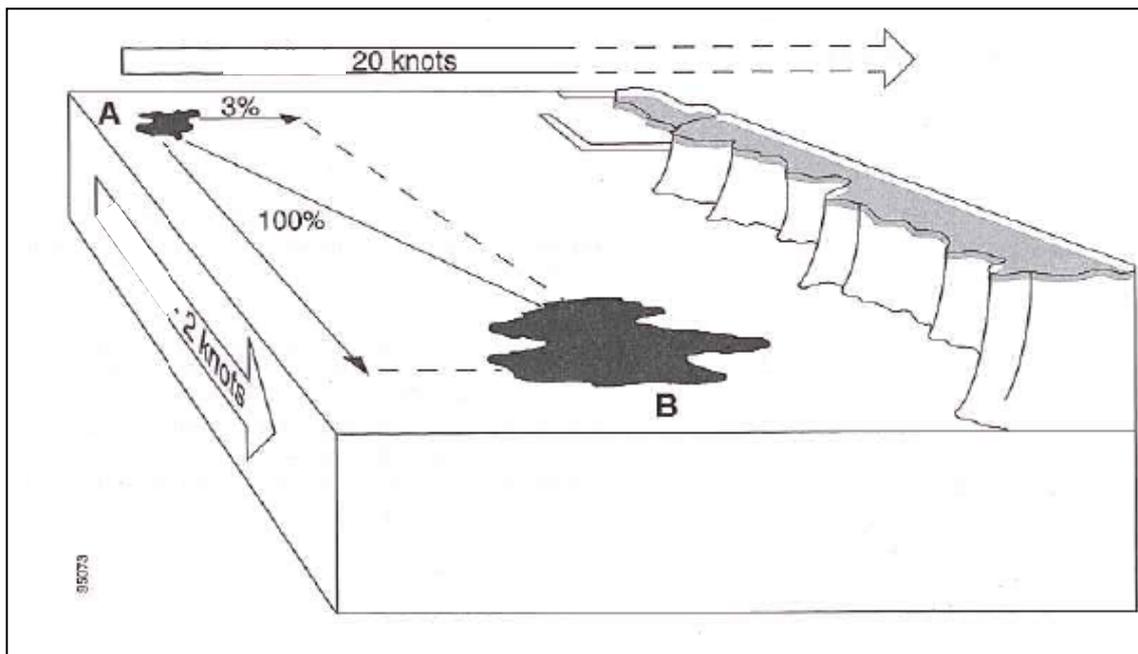


Figura 2.3 – Ação combinada do vento e corrente na previsão da movimentação da mancha de óleo derramada no mar (IMO, 2005)

#### 2.1.4. Ação Combinada dos Processos

Os diferentes processos que alteram as propriedades do óleo e fazem com que ele seja removido da superfície da água dependem de diversos fatores, como tipo de óleo, temperatura, clima e condições de mar. Os processos de espalhamento, dispersão, evaporação, emulsificação e dissolução são mais importantes durante as fases iniciais de um derramamento enquanto que a oxidação, sedimentação e biodegradação são mais importantes para definir o destino final do óleo derramado. Para entender como diferentes tipos de óleos mudam ao longo do tempo é preciso entender como esses processos interagem e para isso alguns modelos foram desenvolvidos.

Um desses modelos usa o conceito de meia vida para grupos de óleo classificados somente pela sua densidade para descrever sua persistência e assim o tempo médio necessário para a sua dissipação no mar. Geralmente, óleos com menor densidade serão menos persistentes. A meia vida é o tempo necessário para 50% de o óleo desaparecer da superfície do mar e após 6 meias vidas, aproximadamente 1% do óleo permanece. Esse modelo é mostrado na Figura 2.4 e os diferentes tipos de óleo são agrupados de acordo com sua densidade:

Densidade menor que 0,8 – Grupo I, densidade entre 0,8 e 0,85 – Grupo II, densidade entre 0,85 e 0,95 – Grupo III e, finalmente, densidade > 0,95 – Grupo IV. As taxas mostradas alteram-se com as condições climáticas e de mar onde, em condições de mar mais agitadas, um óleo classificado do grupo 3 por sua densidade pode comportar-se como um óleo do grupo 2.

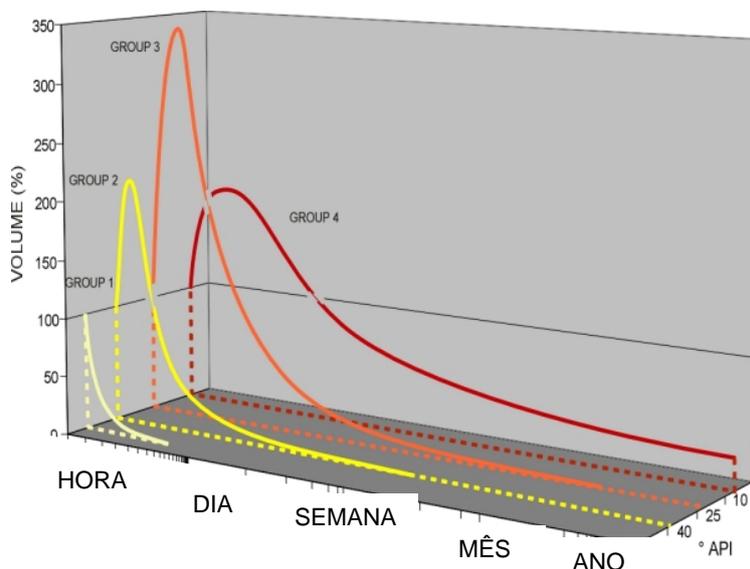


Figura 2.4 – Persistência do óleo no mar de acordo com sua densidade (IMO, 2005)

## 2.2. Opções de Resposta e suas Limitações

Para que a resposta a um derramamento de óleo seja efetiva uma estratégia deve ser definida e então ajustada considerando as áreas sensíveis possivelmente afetadas e medidas possíveis disponíveis para prevenir ou mitigar o dano. A ordem de importância das áreas sensíveis pode variar de acordo com a época do ano, por exemplo, períodos de reprodução de espécies ou temporadas de turismo e por isso, todas as avaliações devem ser feitas através de um levantamento do mapa de sensibilidade ambiental da área de influência.

Todas as medidas de resposta a derramamento de óleo têm limitações. Dadas circunstâncias não favoráveis, existe a possibilidade de que nenhuma resposta seja efetiva e que o óleo deva ser deixado sob os efeitos naturais descritos anteriormente. Entretanto, quando existe a possibilidade de se fazer alguma coisa para prevenir ou mitigar os danos, decisões para implementá-las devem ser tomadas rapidamente porque algumas técnicas, como a do uso de dispersantes e a queima *in situ* têm janelas de oportunidade de aplicação muito

pequenas. Mesmo que elas sejam uma opção apropriada no princípio de um evento, uma demora na escolha e implementação da técnica pode acarretar na sua inviabilidade como opção de resposta. Por isso, é importante que o critério para seleção e aprovação do uso dessas técnicas seja claramente definido e compreendido pelas pessoas responsáveis pela tomada de decisões para que possa ser implementado o mais rápido possível.

Uma combinação de várias opções de resposta pode vir a ser necessária, principalmente em um derramamento de grande porte, pois algumas técnicas de resposta podem tornar-se ineficientes, enquanto outras podem tornar-se mais apropriadas no decorrer do evento. Por isso, as opções de técnicas de resposta devem ser continuamente avaliadas durante a operação e é necessário compreender suas características, vantagens e limitações.

As opções de resposta são:

1. Nenhuma ação além do Monitoramento e Avaliação do óleo: essa opção pode ser a mais apropriada, por exemplo, se o óleo não estiver indo em direção a costa, ou se nenhuma área sensível estiver em risco, ou se o óleo estiver dissipando-se naturalmente de forma satisfatória, ou se outras ações de resposta forem impraticáveis.
2. Contenção e Recolhimento do óleo no mar: em algumas circunstâncias a resposta apropriada é conter o óleo flutuante em barreiras rebocadas por embarcações e recolher esse óleo para armazenamento e posterior destinação em terra.
3. Dispersão Química do óleo no mar: em algumas circunstâncias a resposta apropriada é melhorar a dispersão do óleo da superfície para a coluna d'água pela aplicação de dispersantes químicos a partir de barcos, helicópteros ou aviões.
4. Queima *in situ* do óleo no mar: a contenção e queima do óleo no mar é uma alternativa possível para a opção mais convencional de contenção e recolhimento, onde o óleo que está contido é queimado ao invés de coletado e destinado à terra.

5. Limpeza de Costa: em várias circunstâncias, é bem provável que algum óleo atinja a costa e a limpeza de costa se torne necessária.

### **2.2.1. Contenção e Recolhimento**

Um dos métodos preferidos, quando viável, é a contenção e recolhimento do óleo derramado usando equipamentos especializados. Normalmente, embarcações rebocando barreiras posicionam-se na trajetória de deslocamento da mancha de óleo e usando bombas especiais (skimmers) recolhem o óleo da superfície da água para tanques de armazenamento temporário. Para concentrar o óleo flutuante no mar, barreiras são rebocadas em uma configuração “U” ou “J” e uma embarcação lança o skimmer que bombeia o óleo para um recipiente de armazenamento temporário.

As propriedades físicas e químicas do óleo podem variar durante um derramamento e por isso vários tipos de equipamentos podem ser necessários dependendo do tipo de óleo. Com as mudanças nas propriedades do óleo, como por exemplo, o aumento da viscosidade à medida que ocorre o processo de evaporação ou a formação de uma emulsificação, essas mudanças podem acarretar em uma influência significativa na efetividade dos equipamentos.

Com o espalhamento do óleo em manchas dispersas em uma grande área, uma operação de contenção e recolhimento precisa ser montada rapidamente, mas considerando um controle adequado das velocidades das embarcações para evitar que o óleo escape sobre as barreiras.

As barreiras e os skimmers também devem ser dimensionados para as condições de mar e o tipo de óleo sendo recolhido. As condições de tempo e de mar influenciam bastante a efetividade das operações. Mesmo com condições de mar adequadas, com os equipamentos corretos e com uma operação bem organizada e controlada, geralmente somente uma pequena quantidade do óleo derramado pode ser recolhida, sendo que as chances de sucessos são maiores em águas abrigadas.

### 2.2.1.1. Barreiras de Contenção

As barreiras de contenção podem ser usadas para vários fins como:

- Prevenir o espalhamento da descarga inicial
- Conter o óleo para recolhimento
- Proteger áreas sensíveis
- Desviar o curso de uma mancha de óleo (proteger áreas sensíveis ou direcionar para praias de sacrifício)

Uma barreira de contenção contém uma *borda livre* - que fica localizada sobre a superfície da água para prevenir que o óleo passe por cima da barreira, uma *saia* - que previne que o óleo escape por baixo da barreira, uma *bóia* - para manter a barreira flutuando, *tensionadores longitudinais* - para compensar os efeitos do vento, ondas e correntes; *lastro* - para manter estabilidade da barreira e um *acoplamento* - para conectar as barreiras como demonstrado na Figura 2.5.

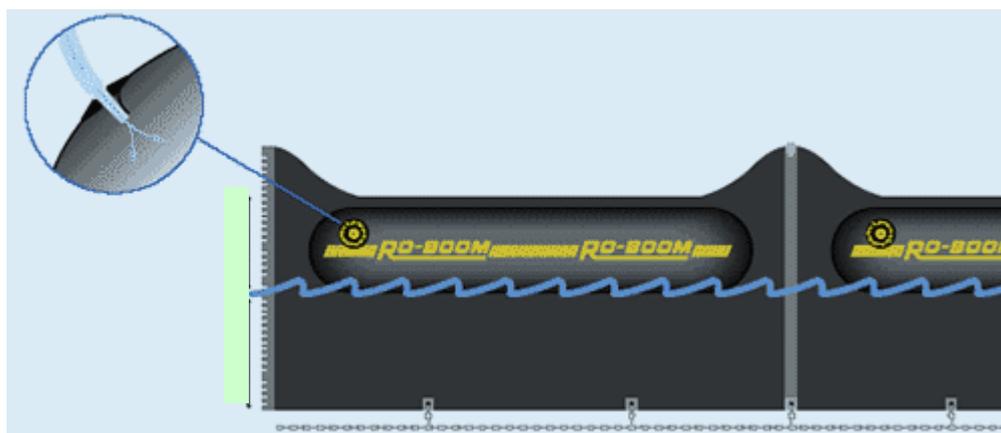


Figura 2.5 – Barreira de contenção (SENTEC, AGO/2007)

Existem vários tipos diferentes de barreiras para uma variedade de aplicações diferentes, mas, apesar de sua estrutura variar, elas podem ser separadas em 4 tipos:

1. Cortina – normalmente possuem flutuação e saia separadas. Podem ser de flutuação sólida, inflável ou auto-inflável.
2. Cerca – possui uma cerca sólida na borda livre.
3. Costeiro – possui uma combinação de compartimentos cheios de água e de ar para selar a costa quando a maré baixa, mas mantém também a barreira flutuante quando a maré sobe.

4. Resistente a fogo – feito de material resistente ao fogo para aplicação no caso de queima *in situ*.

#### Selecionando uma barreira de contenção

Existem várias características a serem consideradas quando seleciona-se um tipo de barreira de contenção e a escolha do tipo correto de barreira é fundamental para o sucesso da operação. A barreira precisa ser grande, forte e robusta o suficiente para suportar as forças exercidas nela, mas deve ser suficientemente flexível para seguir a corrente predominante. Deve ser produzida de material que resista a eventuais furos, facilmente transportado e rapidamente lançado e ser visível quando lançada.

A Tabela 2.1 dá uma orientação geral para seleção dos tipos de barreiras:

	<b>Águas Calmas</b>	<b>Águas Calmas Correntes</b>	<b>Águas protegidas</b>	<b>Águas Abertas</b>	<b>Águas Abertas Turbulentas</b>
<b>Altura Ondas (m)</b>	< 0,3	< 0,3	0 – 1,0	0 – 2,0	> 2
<b>Condições</b>	Ondas pequenas, curtas, não quebram	Correntes de 0,4m/s ou maiores	Pequenas ondas com poucas pontas brancas	Ondas moderadas com frequentes pontas brancas	Ondas grandes com pontas brancas e algum spray
<b>Tipo de barreira adequada</b>	Cortina Cerca	Cortina (com borda livre de 50% da altura da barreira) Cerca	Cortina Cerca	Cortina Cerca (com suporte externo de tensão)	Cortina
<b>Altura da Barreira (mm)</b>	150 – 600	200 – 600	450 – 1100	900 – 2300	1500 +

**Tabela 2.1 – Critérios de seleção de barreiras (IMO, 2005)**

### ***2.2.1.2. Equipamentos de Recolhimento – Skimmers***

Existem diversos tipos de skimmers disponíveis, projetados para recolher o óleo sobrenadante na superfície da água. O princípio de funcionamento dos diferentes tipos de skimmer são bem variados, mas também podem ser divididos em quatro categorias (apesar de alguns ter características de mais de uma categoria).

1. Vertedouro – esses equipamentos possuem um vertedouro localizado na interface óleo / água para permitir que somente o filme de óleo flutuante entre no ponto coletor onde o óleo é bombeado para o local de armazenamento temporário. Esse skimmers geralmente são ajustáveis para permitir que o vertedouro seja posicionado para coletar o máximo de óleo e o mínimo de água possível conforme Figura 2.6.
2. Adesão – esses equipamentos utilizam materiais oleofílicos, onde o óleo adere, em forma de discos, cordas, tambores, etc. O óleo aderido à superfície oleofílica é suspenso da água e pode ser raspado ou espremido para retirar o óleo, que é coletado em um recipiente apropriado, conforme Figura 2.7.
3. Indução – esses usam o movimento da água onde o skimmer está localizado ou um fluxo criado pelo próprio equipamento para induzir um fluxo de óleo através do equipamento para separação e coleta.
4. Outros princípios – existem vários outros tipos de equipamentos não-especializados que podem ser improvisados para a coleta de óleo em algumas circunstâncias. Sistemas de vácuo, redes, etc.

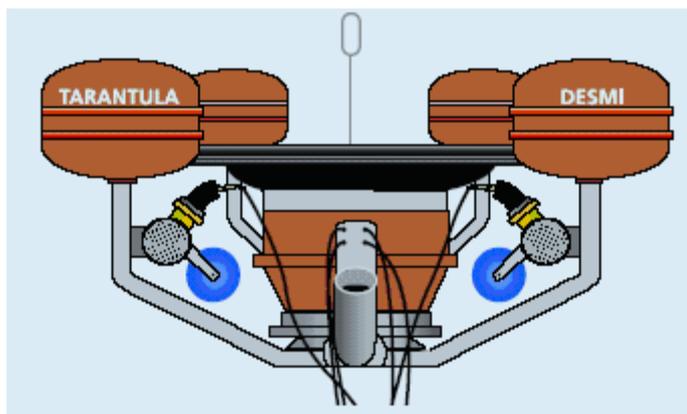


Figura 2.6 – Skimmer Tarantula – vertedouro (SENTEC, AGO/2007)



Figura 2.7 – Skimmer Alligator – adesão (SENTEC, AGO/2007)

### 2.2.1.3. Armazenamento Temporário

A provisão de armazenamento temporário para o óleo recolhido é crucial para o sucesso de uma operação de contenção e recolhimento. As opções mais utilizadas para armazenamento temporário são:

Tanques das embarcações – Uma vez que a capacidade desses tanques seja atingida a embarcação precisa voltar para costa para descarregar essa mistura oleosa podendo por vezes limitar o tempo de operação de recolhimento. Outro problema encontrado com tanques das embarcações é que por vezes o óleo bombeado para eles pode ser de difícil remoção, especialmente para óleos mais viscosos.

Balsas – Balsas normalmente são de grande capacidade de armazenamento, mas podem ser de difícil manobra. Outro problema que pode existir é o da sua alta borda livre que para óleos mais viscosos pode comprometer a capacidade de bombeamento através do skimmer ou de bombas de pequeno porte.

Tanques Flutuantes – Esses tanques normalmente são projetados para esse tipo de operação e possuem diversas facilidades, alguns tanques possuem sistema de flutuação próprio de modo que flutuam quando vazios e ficam quase submersos se cheios.

#### *2.2.1.4. Absorventes*

O recolhimento do óleo é feito principalmente através de skimmers, mas materiais absorventes também podem ser usados em alguns casos quando o volume de óleo é pequeno e o recolhimento com skimmers se torna inviável. Esses materiais podem ser aderentes ou absorventes. Os aderentes são os materiais nos quais o óleo adere à superfície do mesmo enquanto que nos absorventes o óleo penetra em seus poros. Por simplicidade ambos são normalmente referidos como “absorventes”. A Figura 2.7 mostra alguns exemplos de materiais absorventes normalmente utilizados em operações de resposta a derramamento de óleo.

Um material absorvente deve ter boa capacidade de absorção de óleo, deve ser de fácil manuseio, facilmente limpável e não apresentar problemas para o seu descarte após o uso.



**Figura 2.7 – Materiais absorventes (CANATEC, SET/2007)**

### **2.2.2. Dispersão Química**

A ação das ondas e a turbulência das correntes causam a quebra do óleo derramado no mar em gotículas que podem ser dissipadas na coluna d'água. Esse processo é chamado de dispersão e pode ser acelerado com a adição de produtos químicos chamados dispersantes. Dispersantes são agentes químicos que alteram o comportamento do óleo na água. Compostos de uma mistura de surfactantes e solventes, sendo os surfactantes os responsáveis por reduzir a tensão de superfície do óleo, aumentando assim a taxa de formação de gotículas e inibindo o reagrupamento dessas gotas, dispersando o óleo na coluna d'água (IMO, 2005). Ao se utilizar a técnica da dispersão química:

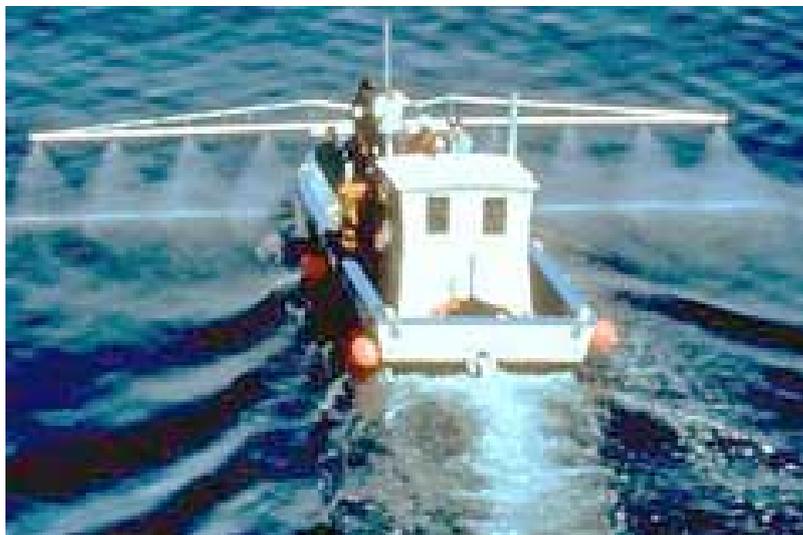
- Previne-se a ação do vento no movimento da mancha de óleo (que pode levá-lo para a costa ou para áreas sensíveis).
- Melhora-se a biodegradação do óleo no ambiente marinho, pois o óleo dispersado tem uma maior área de interface com a água do mar favorecendo assim a biodegradação.
- Aumenta a exposição da vida marinha ao óleo na locação onde ele foi dispersado aumentando assim a toxicidade da água local.

A decisão de usar ou não dispersantes deve ser tomada comparando-se o dano potencial do óleo dispersado ou não dispersado à vida marinha. Ao identificar áreas onde os dispersantes podem ser usados, áreas com alta capacidade de diluição (como mar aberto) são geralmente mais adequadas. O seu uso em águas abrigadas, baías e corpos lânticos não é recomendado. A efetividade da dispersão do óleo depende de suas características, das condições climáticas e de mar. Na maioria dos casos, a viscosidade é o principal parâmetro para determinar se óleo será suscetível ou não ao uso de dispersantes.

#### **2.2.2.1. Técnicas de Aplicação de Dispersantes**

Existem diversas precauções de segurança para a aplicação de dispersantes e os operadores de sua aplicação devem ser adequadamente treinados para essa operação. Dispersantes podem ser aplicados em uma

mancha de óleo através de navios (Figura 2.8) ou aeronaves. O material dispersante não deve ser aplicado em gotas muito leves (que não chegam a entrar em contato com o óleo) ou em gotas muito pesadas (que passam através do óleo sem reagir com ele).



**Figura 2.8 – Embarcação aplicando dispersantes (NOAA, SET/2005)**

### **2.2.3. Limpeza de Praia**

Caso o óleo derramado atinja a costa, tornam-se necessárias operações de limpeza de praia buscando restabelecer seu estado natural e seu valor socioeconômico. A decisão de limpar ou não a área afetada dependerá do efeito potencial do óleo nos recursos biológicos e nas atividades comerciais e recreativas afetadas. Além dos efeitos (positivos ou negativos) da própria limpeza e da segurança dos trabalhadores para realizar tal limpeza.

A característica da costa determina a distribuição final e a persistência do óleo naquele ambiente afetando assim diretamente a efetividade das diferentes estratégias de limpeza de costa. A característica da costa é determinada pelos seguintes componentes:

1. Tipo de Substrato – material do qual ela é composta
2. Forma da Costa – seu formato
3. Energia – função das correntes e ondas presentes no local
4. Característica biológica – comunidades presentes de plantas e animais

### ***2.2.3.1. Métodos de Limpeza de Praia***

Existem diversos métodos de limpeza de praias que variam de recolhimento manual até o uso de diferentes tipos de equipamentos. Entre eles podemos citar:

- Dissipação Natural
- Remoção Manual
- Uso de Absorventes
- Uso de maquinário específico
- Uso de caminhões a vácuo
- Lavagem de baixa e alta pressão
- Uso de agentes químicos
- Jateamento de areia
- Biorremediação

Recolhimento manual pode ser usado em diversos tipos de costas e é geralmente bem seletivo no que é recolhido, gerando comparativamente pouco resíduo. Porém o processo de limpeza com essa técnica pode ser lento. Absorventes também podem ser utilizados para recolher camadas finas de óleo ou para proteger praias. Esse material é então recolhido após o seu uso e reprocessado.

Outra alternativa para recolhimento do óleo e do material contaminado pelo derramamento é o uso de máquinas como retroescavadeiras e/ou caminhões a vácuo. Essas máquinas podem recolher quantidades maiores de material, mas com pouca precisão, aumentando assim significativamente a quantidade de resíduos gerados a serem destinados.

Lavagem em alta e baixa pressão é usualmente utilizada quando o óleo encontra-se aderido a uma superfície, como em costões rochosos. Dependendo do grau de aderência desse óleo o jateamento de areia ou agentes químicos pode ser necessário para sua limpeza.

### **2.3. Legislação Aplicável**

Nesta seção analisaremos a legislação relacionada ao tema para compreender a sua influência na determinação dos recursos a serem disponibilizados no Plano de contingência para derramamento de óleo de projetos de perfuração e produção de óleo.

#### **2.3.1. Legislação Internacional Aplicável**

Desastres significativos de derramamento de óleo no mar no mundo trouxeram atenção para a necessidade de elaboração de normas e regulamentos internacionais de natureza relacionada à poluição marinha. Propostas de medidas para proteção do meio ambiente marinho foram encaminhadas a fóruns internacionais pertinentes, em especial à Organização Marítima Internacional (IMO).

A IMO, criada em 1982 a partir de uma reorganização do IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultive Organization), é uma agência das Nações Unidas com o objetivo de melhorar as condições de segurança no mar e de proteger o meio ambiente marinho através de convenções internacionais, protocolos e emendas, sendo uma das principais convenções a Marpol 73/74 - Tratado para Prevenção da Poluição Marinha. Os procedimentos adotados internacionalmente com relação a incidentes com derramamento de óleo no mar têm por base primária os critérios adotados por países signatários do MARPOL 73/74. A partir deste tratado, cada país regulamenta seu programa de atividades petrolíferas de acordo com as atribuições dos órgãos de gestão ambiental (IBAMA, INF. TÉC. Nº 023, 2002). A Convenção MARPOL veio a ser promulgada no Brasil pelo Decreto no 2.508/98.

Mais recentemente, a **Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo, (OPRC-1990)** foi motivada pela ocorrência do acidente com o navio Exxon Valdez no Alasca (1989), sendo estabelecida pela IMO em 30/11/90, passando a vigorar em 1995. Essa convenção tem como objetivo criar medidas para facilitar a cooperação internacional e a assistência mútua no preparo para o atendimento aos casos de vazamento de óleo e também incentivar os países participantes a

desenvolverem e manterem uma capacitação adequada para lidar com emergências desse tipo. O Brasil internou a Convenção OPRC – 1990 no país por meio do Decreto no 2.870, de 1998, passando a prever o desenvolvimento de um sistema nacional para responder aos incidentes de poluição por óleo, de acordo com os preceitos dessa Convenção (HUET, 2003). Também influenciada por esse acidente, o "**Oil Pollution Act**" (**OPA 90**) aperfeiçoou e reforçou a capacidade dos EUA quanto a prevenção e resposta à acidentes catastróficos de derramamento de óleo no mar.

O OPA/90 requer que navios e facilidades que manipulem óleo ou derivados definam planos de resposta estabelecidos pelo governo federal detalhando como irão responder a grandes acidentes de derramamento de óleo. Requer que sejam desenvolvidos Planos de Contingência de Área de modo a se estar preparado para responder a derramamentos de óleo numa escala regional.

Além das regulamentações da IMO, a Convenção Geral das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (UNCLOS), também chamada Convenção de MONTEGO BAY, de 1982, dedica um capítulo à proteção e à preservação do ambiente marinho.

### ***2.3.2. Legislação Nacional Aplicável***

O Brasil, de forma similar, também acompanhou essa tendência em suas regulamentações para o planejamento e resposta a incidentes de derramamento de óleo no mar, processo catalisado pela ocorrência de graves acidentes que sensibilizaram a opinião pública e as autoridades para essa necessidade. Um desses acidentes que teve importância particular foi o rompimento de um duto entre a Refinaria Duque de Caxias e o Terminal da Ilha d'Água, na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, em 18 de janeiro de 2000, que ocasionou o derramamento de 1,3 mil m<sup>3</sup> de óleo combustível para as águas da Baía. O vazamento durou quatro horas e provocou danos ambientais importantes, atingindo manguezais da região e afetando diversas atividades como a pesca e o turismo.

Logo após esse acidente da Baía de Guanabara, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) promulgou a Resolução 265 em 27 de janeiro de 2000, que determina às autoridades competentes que elaborem ou revisem, no prazo de 12 meses, o plano de contingência nacional e os planos de emergência regionais, estaduais e locais para acidentes ambientais causados pela indústria de petróleo e derivados. Esta Resolução estabeleceu também a realização de auditorias ambientais em instalações da indústria do petróleo, visando avaliar as ações de controle e prevenção da poluição por derramamento de óleo no mar.

Em 28 de abril de 2000, foi promulgada a Lei 9.966 que dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional. A Lei 9.966 determina que as instalações cobertas por ela disponham de planos de emergência individuais para o combate à poluição por óleo e substâncias nocivas e perigosas e que, em áreas onde se concentrem estas instalações, os planos de emergência individuais sejam consolidados em um único plano de emergência para toda a área. A Lei 9.966 determina ainda que o órgão ambiental competente consolide estes planos de emergência na forma de planos de contingência locais ou regionais, em articulação com os órgãos de defesa civil.

Nesse mesmo ano, em 14 de Setembro, foi promulgada a Resolução CONAMA 269 que regulamenta a produção, importação, comercialização e uso de dispersantes químicos para combate a derramamentos de óleo no mar.

Visando à regulamentação dos planos de emergência individuais requeridos pela Lei 9.966, o CONAMA promulgou a Resolução 293, de 12 de dezembro de 2001, que estabelece o conteúdo mínimo e orienta a elaboração destes planos. Também para atender a outro requisito da Lei 9.966, em 6 de novembro de 2003, foi promulgado o Decreto 4.871 que dispõe sobre a instituição dos Planos de Área.

Analisaremos a seguir as regulamentações pertinentes ao estabelecimento de planos de emergência individuais e seus recursos de resposta.

### **2.3.2.1. Resolução CONAMA 265/2000 e Lei 9.966**

A Resolução CONAMA 265/2000 faz referência a quatro planos, sem, no entanto definir ou estabelecer correlação entre eles (SOUZA *et al.*, 2004):

- Plano de contingência nacional;
- Planos de emergência regionais;
- Planos de emergência estaduais; e
- Planos de emergência locais.

Segundo a Resolução caberia às autoridades competentes a elaboração ou revisão destes planos no período de 12 meses, prazo este que se encerrou em janeiro de 2001.

Já a Lei 9.966 determina que os planos de emergência sejam elaborados de acordo com uma seqüência. Inicialmente, planos de emergência individuais devem ser preparados para portos organizados, instalações portuárias e plataformas, e suas instalações de apoio.

Nas áreas onde haja concentração destas instalações, a Lei determina que os planos de emergência individuais sejam “consolidados na forma de um único plano de emergência para toda a área sujeita ao risco de poluição”. Estes planos passaram a ser denominados “planos de área”. Em seguida, segundo a Lei, os planos de emergência citados anteriormente devem ser consolidados pelo órgão ambiental competente “na forma de planos de contingência locais ou regionais”, que devem por sua vez ser consolidados pelo órgão federal de meio ambiente “na forma do Plano Nacional de Contingência”.

### **2.3.2.2. Plano de Emergência Individual (PEI) - Resolução CONAMA 293/2001**

A proposta de regulamentação dos planos de emergência individuais requeridos pela Lei 9.966 foi elaborada por um grupo de trabalho coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente e que teve a participação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA); Diretoria de Portos e Costas / Marinha do Brasil (DPC/MB); Diretoria-Geral de

Navegação / Marinha do Brasil (DGN/MB); Ministério dos Transportes; Ministério das Minas e Energia; Agência Nacional do Petróleo (ANP); Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás Natural (IBP) e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) (Souza *et al.*, 2004).

A proposta foi aprovada pela plenária do CONAMA na reunião de 12 de dezembro de 2001 e publicada no Diário Oficial da União em 5 de fevereiro de 2002 como a Resolução CONAMA 293/2001.

A Resolução CONAMA 293/2001 representa indubitavelmente um avanço no planejamento e preparação para resposta a incidentes de poluição por óleo no Brasil. Ela padroniza de forma tecnicamente consistente os planos de emergência para derramamento de óleo que devem estar apoiados na identificação dos riscos, na análise de vulnerabilidade das áreas possivelmente afetadas, no estabelecimento de uma sólida estrutura organizacional e na clara definição dos procedimentos de resposta.

A parte mais criticada da Resolução CONAMA 293/2001 é o seu Anexo III, no qual estão definidos os critérios a serem considerados para o dimensionamento da capacidade **mínima** de resposta. Embora seja justificável o requerimento de que as instalações garantam a disponibilidade de uma certa quantidade de equipamentos e materiais para uso nas operações de combate, o Anexo III da Resolução possui algumas contradições e inconsistências no tratamento deste problema.

A primeira contradição que chama atenção aparece quando são definidos critérios para barreiras flutuantes “para todas as instalações, exceto plataformas *offshore*”, exceção que não aparece nos outros equipamentos, como nos recolhedores (*skimmers*), embora, não seja tecnicamente usual efetuar o recolhimento do óleo sem a sua prévia contenção e acumulação.

Ainda com relação a barreiras, são definidos critérios para o dimensionamento da quantidade mínima para três situações: cerco completo da embarcação ou da fonte do derramamento, proteção de corpos d’água e contenção da mancha de óleo. Todos estes critérios estão baseados em referências técnicas que recomendam o cálculo da extensão necessária de barreiras para contenção de um derramamento a partir de dados operacionais,

como o comprimento da embarcação, a largura e velocidade da corrente do corpo d'água e a largura da mancha, respectivamente para fins estratégicos, ou seja, de planejamento, previsão antecipada de recursos, isto é possível nos dois primeiros casos, porém determinar com antecedência uma largura de mancha, embora possível, é absolutamente arbitrário já que depende de diversos fatores que afetam o espalhamento do óleo, entre eles as condições de mar e o tempo decorrido desde o início do derramamento.

Outra fragilidade técnica do Anexo III está nos critérios definidos para o cálculo da capacidade de recolhimento de óleo no caso de instalações de perfuração ou produção de petróleo. Os requisitos contemplam três níveis de descarga – pequena (até 8 m<sup>3</sup>), média (até 200 m<sup>3</sup>) e a chamada de pior caso, ou seja, o maior passível de ocorrer no dado projeto – para os quais são estabelecidos a capacidade efetiva diária de recolhimento de óleo (CEDRO) e o tempo para disponibilidade dos recursos no local da ocorrência da descarga.

No caso de instalações de perfuração ou produção petrolífera, o Anexo II da Resolução determina que o cálculo do volume correspondente à descarga de pior caso deva ser feito considerando a liberação de óleo durante 30 dias da vazão diária estimada decorrente da perda de controle do poço, vazão essa que deve ser justificada tecnicamente com base nas características conhecidas ou esperadas do reservatório. O problema está no fato de que os critérios de dimensionamento estabelecidos no Anexo III não fazem distinção entre os tipos de liberação. Por exemplo, no caso da perda de controle do poço, ela é contínua de longa duração e no caso de tanques são liberações instantâneas ou ainda, no caso de dutos, são contínuas de curta duração (da ordem de horas e não de dias). Como consequência, resulta a necessidade de garantir-se a disponibilidade de uma quantidade de recursos para recolhimento de óleo bastante superior à que seria efetivamente necessária.

Além de ser uma exigência tecnicamente injustificável, esta distorção tem reflexos no planejamento logístico e na contratação de recursos para combate, o que é agravado pelo fato de o Brasil não contar ainda com um mercado amadurecido de prestação de serviços de resposta a acidentes com materiais perigosos e, em particular, derramamentos de óleo.

### **2.3.3. O Licenciamento Ambiental**

O licenciamento ambiental é uma obrigação legal, prevista na Lei 6.938, prévia à instalação de qualquer empreendimento ou atividade potencialmente poluidora ou degradadora do meio ambiente. As atividades de exploração e produção de petróleo são consideradas potencialmente poluidoras e, como tal, são sujeitas a licenciamento ambiental prévio.

O licenciamento das atividades marítimas de petróleo e gás natural é de responsabilidade do IBAMA e executado pela Coordenação Geral de Licenciamento de Petróleo e Gás (CGPEG). Os procedimentos para o licenciamento ambiental de atividades de Exploração e Produção Marítima de Petróleo estão regulamentados pelas Resoluções CONAMA nº 237/97, nº 23/94 e nº 350/04.

O empreendedor elabora estudos ambientais baseados em um Termo de Referência emitido pelo órgão licenciador específico para a atividade a ser licenciada, que serão analisados pelo órgão ambiental. Em linhas gerais, tais estudos incluem:

- Descrição da atividade cujo licenciamento é pretendido
- Definição da área de influência da atividade
- Diagnóstico ambiental da área de influência, incluindo os aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos
- Identificação e avaliação dos possíveis impactos ambientais gerados pela atividade
- Proposição de medidas de controle e mitigação dos impactos ambientais identificados

Os impactos ambientais de empreendimentos petrolíferos são classificados de acordo com sua natureza. Tipicamente, tais interferências podem ser divididas em duas categorias, a saber:

- Impactos operacionais – são interferências ambientais advindas da operação normal do empreendimento. Incluem as

conseqüências e desdobramentos da operação em si, dentro de sua condição de normalidade.

- Impactos acidentais – são as conseqüências ambientais de eventos não esperados na operação. Incluem, portanto, os impactos ambientais advindos de eventuais acidentes.

Como dito anteriormente, para os impactos ambientais identificados, medidas de controle preventivo e mitigação devem ser propostos buscando eliminar ou minimizar interferências negativas ao meio ambiente.

Para os impactos operacionais, a eliminação ou mitigação de seus efeitos pode ser alcançada através da revisão do projeto, ou da implantação de programas ambientais. Como exemplo, pode-se citar o impacto decorrente de descarte de efluentes e resíduos. A redução do volume de descarte através do uso racional de recursos naturais ou otimização da planta de processo, ou a adoção de técnicas de tratamento de efluentes previamente ao descarte, são consideradas medidas mitigadoras de impactos operacionais.

Já os impactos acidentais têm uma abordagem diferente, na qual o conceito de risco ganha importância. Portanto, ações devem ser previstas tanto no sentido de se reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos acidentais, como visando à redução de suas conseqüências. As ações de prevenção de ocorrência de acidentes são consolidadas no Plano de Gerenciamento de Riscos do empreendimento, enquanto que as medidas de resposta e combate são parte integrante do seu Plano de Emergência Individual conforme regulamentado na Resolução CONAMA 293/2001.

Nesse âmbito do licenciamento, o conteúdo do Plano de Emergência Individual não é simplesmente uma aplicação direta dos cálculos da Resolução CONAMA 293/2001, visto que essa resolução estabelece o **mínimo** que usualmente só é aplicado diretamente para projetos em águas afastadas da costa, onde a modelagem indique que o óleo levará dezenas de horas até que atinja a costa ou qualquer área sensível. Para projetos em águas mais próximas a regiões sensíveis, como é o caso do projeto em estudo neste trabalho, o impacto é muito rápido e os recursos devem estar disponíveis quase que imediatamente. Nesses casos, o escalonamento de chegada dos equipamentos não é adequado, pois se os recursos chegarem no prazo

previsto, o óleo derramado no mar já teria atingido a costa. Logo, é no processo de licenciamento que se dá a aprovação do Plano de Emergência Individual (PEI) e, conseqüentemente, dos recursos de resposta necessários para a realização daquele projeto.

### 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE PROBLEMAS RELACIONADOS A DERRAMAMENTO DE ÓLEO COM ENFOQUE DE OTIMIZAÇÃO

#### 3.1. Modelos Estratégicos / Táticos / Operacionais.

O problema de derramamento de óleo é um problema complexo que pode ser estruturado nos níveis estratégico, tático e operacional. As decisões tomadas em um nível superior serão restrições para os problemas formulados no nível inferior.

Para o problema de derramamento de óleo sob o enfoque estratégico são consideradas as decisões relacionadas ao **investimento** e ao **planejamento de longo prazo**, sendo então determinados os tipos e as quantidades de equipamentos necessários e os locais mais adequados para armazená-los de maneira que se tenha uma capacidade adequada para responder a potenciais derramamentos de óleo que possam vir a ocorrer ao longo de um horizonte de tempo especificado. Um dos requisitos que direcionará o posicionamento destes equipamentos é o atendimento do tempo máximo de resposta requerido para cada um dos cenários de derramamentos identificados.

Os níveis tático e operacional dizem respeito às decisões a serem tomadas após a ocorrência do acidente. No nível tático são tratadas as decisões relacionadas à resposta a um acidente de derramamento de óleo específico, definindo-se para este o número e tipo de equipamentos que serão alocados à cena no início do acidente e durante o seu andamento. O problema tático assume que o problema estratégico tenha sido resolvido, uma vez que decisões no nível tático utilizarão os equipamentos que foram disponibilizados no plano estratégico. O nível operacional está relacionado com o uso dos equipamentos uma vez que estes tenham chegado à cena do acidente. Nele são examinadas com muito mais detalhe as ações que devem ser tomadas durante o acidente, qual a configuração geométrica adequada aos equipamentos ou qual a alocação espacial dos equipamentos de resposta ou limpeza. Decisões operacionais determinam exatamente como utilizar o sistema de resposta prescrito pelo nível tático.

### **3.2. Abordagem de Otimização**

Na preparação de um plano de contingência efetivo devem ser considerados vários fatores e diversas alternativas, o que motiva uma abordagem quantitativa para auxiliar a tomada de decisão (SRINIVASA e WILHEAM, 1996). Nos EUA, o Code of Federal Regulations (1994) detalha os métodos qualitativos para preparação de planos de contingência para aprovação da Guarda Costeira. Os autores citados comentam que em 1996 nenhum método de planejamento quantitativo estava em uso.

Uma opção de abordagem quantitativa é a utilização de modelos de otimização que auxiliam na avaliação das propostas de decisões a serem tomadas tanto em um nível estratégico, quanto em um nível tático. Modelos de otimização são utilizados para definir soluções ótimas de problemas que podem ser estruturados em função de variáveis de decisão. Nestes modelos existe uma função objetivo que deverá ser maximizada ou minimizada associada a um conjunto de funções que representam as restrições do problema, restrições estas que deverão ser atendidas. A solução ótima do problema corresponderá a um conjunto de valores que são assumidos pelas variáveis de decisão que maximizam ou minimizam a função objetivo ao mesmo tempo em que atendem a todo o conjunto de restrições.

#### **3.2.1. Modelos Estratégicos de Otimização Relacionados à Resposta ao Derramamento de Óleo**

Para o caso específico do problema de otimização de resposta a derramamentos de óleo as restrições típicas serão, entre outras, o atendimento do limite de capacidade dos recursos disponibilizados e o atendimento da exigência legal que definirá a capacidade de resposta necessária para os cenários de derramamento identificados. As variáveis de decisão serão num problema estratégico: as instalações de armazenamento que deverão ser estabelecidas, a quantidade e tipos de equipamentos que deverão ser armazenados nas instalações estabelecidas.

São encontrados na literatura relativamente poucos modelos na linha dos modelos de otimização aplicados a problemas de resposta a

derramamentos de óleo. (PSARAFITIS, THARAKAN e CEDER, 1986) comentam que apesar da literatura geral de derramamento de óleo ser rica, é justo dizer que este tópico tenha recebido até a data citada menos atenção na literatura de Pesquisa Operacional do que realmente mereça, embora, como frisam estes autores, alguns estudos de valor tenham sido realizados.

Psaraftis e Ziogas (1985) acrescentam que os estudos de derramamento de óleo não estão no mesmo nível de “estado da arte” que os estudos de outros serviços de emergência, como por exemplo, os serviços urbanos para os quais existe uma ampla literatura. O mesmo pode-se dizer em relação aos modelos de otimização estratégicos relacionados a transporte marítimo de óleo que levem em consideração o risco de derramamento de óleo, (IAKOVOU e DOULIGERIS, 1996).

Iakovou, Douligeris e Korde (1994) colocam que a maior parte dos modelos desenvolvidos são utilizados como modelos descritivos, que fornecem direções para o problema de decisão e não têm sido utilizados na prática. Isto se dá, segundo eles, devido à complexidade do problema, que inclui uma grande quantidade de restrições tanto legais, quanto administrativas.

Mais recentemente, Srinivasa e Wilhelm (1996) comentam também que poucos estudos foram realizados na linha de modelos estratégicos de derramamento de óleo.

Alidi (1993) citou também que poucos estudos foram realizados considerando modelos de otimização para localização de centros de resposta para derramamento de óleo. Salientando que, na maioria dos casos, a validade de tais modelos se baseou em exemplos hipotéticos, sempre retratando situações pertinentes aos Estados Unidos. Sugeriu então que, para poder ser confirmada a eficácia de tais modelos, eles deveriam ser aplicados a situações reais devendo os resultados dessas aplicações ser analisados cuidadosamente. Acrescentou ainda que, antes de serem aplicados em outras regiões do mundo fora dos Estados Unidos, esses modelos deveriam estar sujeitos a um estudo completo e a adaptações para se ajustar às novas situações.

### ***3.2.1.1. O Modelo de Charnes, Cooper, Harrald, Karwan e Wallace***

Charnes et al., 1976 formularam um modelo multidimensional de programação por metas para auxiliar na alocação de recursos dentro do Programa de Proteção Ambiental Marinho – Marine Environmental Protection (MEP) da Guarda Costeira dos Estados Unidos, que foi estabelecido em 1971. Este modelo não foi direcionado especificamente para auxiliar na tomada de decisões relacionadas à resposta a derramamentos de óleo e sim para alocar recursos limitados às diversas atividades cujo objetivo final era a proteção do meio ambiente marinho dentro do programa MEP.

Este modelo define a alocação ótima de horas para os recursos (pessoas, barcos e veículos) que são utilizados em patrulhas diurnas e noturnas em diversas atividades do programa ambiental citado. Tais patrulhas são realizadas para atender a metas definidas para o cumprimento dos quatro objetivos principais do MEP.

Estes objetivos são:

- 1) Prevenção quanto a incidentes de poluição,
- 2) Ações legais apropriadas contra a violação dos regulamentos de poluição,
- 3) Vigilância para detectar e, se possível deter, vazamentos e a falha em reportar acidentes,
- 4) Prover uma resposta eficiente, coordenada e efetiva a fim de minimizar o dano a partir de vazamentos de óleo e outros materiais perigosos.

### ***3.2.1.2. O Modelo de Charnes, Cooper, Karwan e Wallace***

Charnes et al., 1979 desenvolveram um modelo utilizando Programação por Metas com Restrições Sujeitas à Incerteza. Este modelo foi desenvolvido para auxiliar a Guarda Costeira Americana a criar políticas relacionadas ao planejamento da alocação de vários tipos de equipamentos requeridos para controlar um derramamento de óleo. Este modelo leva em consideração simultaneamente os aspectos estratégico e operacional e foi aplicado a

somente um exemplo ilustrativo (envolvendo três localizações para os equipamentos, três tipos de equipamentos, e três locais de ocorrência dos derramamentos).

### ***3.2.1.3. O Modelo de Belardo, Harrald, Wallace e Ward***

Belardo *et al.*, 1984 desenvolveram uma extensão do Modelo de Máxima Cobertura proposto por Church e Reville (1974), o qual maximiza uma soma ponderada dos centros de demanda cobertos por um número fixo de estabelecimentos de serviços de emergência, aplicando para centros de resposta para derramamentos de óleo.

Aplicaram este modelo à região do corpo d'água *Long Island Sound*, sob o qual no período do estudo trafegavam navios transportando uma média anual aproximada de 35 milhões de toneladas de produtos derivados de petróleo, sendo esta uma região ambientalmente sensível e usada por milhões de pessoas inclusive para recreação.

Esta região citada foi dividida em seis subáreas, com o objetivo de assumir homogêneas as características de risco e de sensibilidade. Foi então identificado para estas áreas possíveis cenários de derramamento em função do tipo do óleo e das condições tempo/mar. Ou seja, cada combinação, local do acidente, tipo de óleo derramado e condições tempo/mar será uma fonte potencial de demanda à qual estarão associados requerimentos específicos de cobertura. Com relação aos requerimentos de cobertura associados aos eventos de derramamento, os autores definiram que um evento estará coberto somente quando cada um dos recursos (conjuntos de sistemas de respostas) necessários estiver posicionado dentro de uma distância tal que atenda ao acidente em um tempo inferior ao tempo de resposta máximo estipulado. Além disso, é exigido que o equipamento utilizado na cobertura seja adequado ao tipo de óleo e à condição de tempo/mar do evento de derramamento.

São estimadas probabilidades para os possíveis eventos de derramamento de óleo, probabilidades estas que serão levadas em consideração na escolha da localização dos recursos de resposta, uma vez que

estes são insuficientes para atender simultaneamente a todos os eventos de derramamento.

Finalmente são identificadas as categorias de potenciais danos econômico-ambientais, os quais variam entre os diferentes eventos de derramamento de óleo. Com todos estes dados de entrada disponíveis, pode ser dado ao problema um enfoque multiobjetivo, possibilitando ao tomador de decisão investigar os *trade-offs* entre cobrir eventos de derramamentos com diferentes potenciais de impacto.

O tomador de decisão define então uma probabilidade de cobertura baseada no impacto do derramamento de óleo no meio ambiente e nos recursos naturais e o modelo define, dentre as diversas localizações candidatas para as instalações de armazenamento dos equipamentos, aquelas que atendam a uma máxima cobertura dos eventos definidos como prioritários, assim como quais serão os conjuntos de sistemas de respostas adequados para cada uma destas instalações escolhidas.

#### ***3.2.1.4. O Modelo de Psaraftis, Tharakan e Ceder***

Psaraftis, Tharakan e Ceder (1986) desenvolveram um modelo estratégico de resposta a derramamento de óleo, que permite definir onde localizar diversos tipos e quantidades de sistemas de resposta capazes de responder a futuros derramamentos de óleo. A localização destes sistemas de resposta leva em consideração eventos com elevado potencial de derramamento de óleo. Os autores fizeram uma aplicação deste modelo na região da Nova Inglaterra enfatizando que esta foi uma ilustração do uso potencial do modelo e não uma descrição de uma real implementação na região citada. Foi formulado um modelo de programação linear misto inteira com o objetivo de minimizar a soma esperada dos custos do sistema de resposta e dos custos dos danos causados pelos derramamentos.

Os autores, embora reconheçam que a avaliação de custos de danos não seja precisa, citam que houve um progresso nesta área, e que possivelmente continuarão a ocorrer melhoras no futuro. Utilizam então em seu modelo, um algoritmo específico proposto por Demis (1984) para estimar os

custos dos danos. Este algoritmo utiliza como entrada informações específicas do derramamento, da área do acidente e da resposta efetuada, produzindo estimativas de danos divididas por categorias.

Este modelo estratégico considera várias características como: frequência de ocorrência de derramamentos, variabilidade do volume de derramamentos, características de operabilidade e de eficiência dos diferentes tipos de equipamentos de resposta (relacionada esta às condições do tempo), custo fixo de abrir uma instalação, custos de aquisição, transporte e operação de equipamentos e custos dos danos causados em função dos volumes de derramamento e do nível de resposta.

Este modelo permite que sejam avaliados *trade-offs* entre os custos de danos e custos do sistema de resposta com o respectivo impacto nas decisões de localização. Foi proposto pelos autores um método de solução baseado em um algoritmo de Síntese em Redes.

#### ***3.2.1.5. O Modelo de Ceder, Tharakan e Psaraftis***

Ceder, Tharakan e Psaraftis (2001) propuseram um aperfeiçoamento no algoritmo heurístico de Síntese em Redes anteriormente citado, para o mesmo problema estratégico de derramamento de óleo. Segundo os autores, bons resultados foram obtidos e a vantagem deste algoritmo está no fato de poderem ser utilizados em problemas de derramamento de óleo de porte real que são por natureza de grande escala.

#### ***3.2.1.6. O Modelo de Iakavou, Douligeris e Korde***

Iakavou, Douligeris e Korde (1996) propuseram um modelo estratégico que possui, segundo eles, uma estrutura integrada nas quais as decisões da localização ótima, número e tipo dos equipamentos a serem armazenados são feitas considerando a alocação ótima dos equipamentos para responder aos derramamentos de óleo. Fizeram uma aplicação deste modelo na Costa da Flórida, mas observam que mais pesquisas devem ser feitas para testar a

validade deste modelo devido à falta de consistência e padronização entre as bases de dados providas pelo excesso de agências estatais e federais existentes nos Estados Unidos. Esse modelo foi o escolhido para a implementação deste estudo de caso e será melhor detalhado adiante por se tratar de uma operação próxima a costa (sem necessidade de escalonamento de chegada de recursos de resposta) e porque os recursos de resposta são dados iniciais do problema.

#### ***3.2.1.7. O Modelo de Srinivasa e Wilhelm***

Srinivasa e Wilhelm (1997) propuseram um modelo estratégico e de planejamento de contingência de área para operações de resposta/limpeza de derramamento de óleo. Segundo estes autores este modelo provê um suporte à decisão unificado, tratando de várias combinações de alternativas possíveis que não eram contempladas na época pelos métodos manuais para preparo de planos de contingência definidos pela legislação.

Citam os próprios autores que aparentemente este é o primeiro modelo a tratar dos requerimentos de resposta/limpeza impostos pelas leis mais recentes. É feita uma aplicação do modelo a uma situação real na área da Baía de Galveston, situada no Texas, área que possui regiões ecologicamente sensíveis e um tráfego intenso de navios que transportam derivados de petróleo, e onde ocorreram diversos derramamentos de óleo, incluindo um dos maiores do mundo, o derramamento do navio Megaborg.

#### ***3.2.1.8. O Modelo de Costa e Ferreira Filho***

Costa (2007) propôs uma extensão ao modelo proposto por Srinivasa e Wilhelm (1996), utilizando idéias do modelo de Psaraftis *et al.*, 1986 e de Iakovou *et al.*, 1996 diferindo dos anteriores por ser o primeiro a considerar também a proteção de áreas sensíveis. Ou seja, não leva em conta somente a chegada dos recursos de resposta de forma gradual e acumulativa, conforme prevê a legislação, assim como também o deslocamento de recursos para proteção de áreas sensíveis potencialmente atingidas ou impactadas em um ou

mais cenários de derramamento identificados. Por se tratar de um modelo que considera também as áreas sensíveis como no problema em questão, apresentamos a seguir o modelo desenvolvido.

#### 3.2.1.8.1. Formulação do Modelo

Inicialmente, são definidas as notações utilizadas neste modelo sendo em seguida apresentadas a sua função objetivo e as suas restrições.

Notações :

##### CONJUNTOS

- F Conjunto das localizações das instalações de armazenamento.
- S Conjunto dos tipos de sistemas de resposta para contenção/recuperação.
- S' Conjunto dos tipos de sistemas de resposta para proteção.
- R Conjunto de todos os locais dos acidentes (pontos de risco).
- C(r) Conjunto dos cenários que podem ocorrer nos pontos de risco r.
- I(cr) Conjunto dos índices correspondentes aos instantes críticos  $t_{icr}$  e às capacidades de recolhimento requeridas associadas  $K_{icr}$ , para responder ao derramamento no ponto de risco r, num cenário c, num instante crítico  $t_{icr}$ .
- S(icr) Conjunto dos sistemas s que podem realizar as operações de contenção/recolhimento em um derramamento no ponto de risco r, num cenário c, no instante crítico  $t_{icr}$ .
- S'(picr) Conjunto dos sistemas s' que podem realizar as operações de proteção, nas áreas sensíveis p associadas a um derramamento em um ponto de risco r, num cenário c, no instante crítico  $t_{icr}$ .
- L<sub>1</sub>(s icr) Conjunto das localizações das instalações que podem despachar sistemas do tipo s, para responder a derramamentos no ponto de risco r, em um cenário c, no instante crítico  $t_{icr}$ .
- L<sub>2</sub>(s' picr) Conjunto das localizações das instalações que podem despachar sistemas do tipo s', para proteger as áreas sensíveis p, num instante

crítico  $t_{icr}$ , de um derramamento em um ponto de risco  $r$ , num cenário  $c$ .

$P(cr)$  Conjunto de áreas sensíveis potencialmente afetadas por um derramamento em ponto de risco  $r$ , num cenário  $c$ .

### ÍNDICES

$f$	localizações das instalações de armazenamento	$f \in F$
$r$	locais dos acidentes (pontos de risco)	$r \in R$
$c$	cenários de derramamento $c \in C(r)$	
$i$	índices dos instantes críticos $t_{icr}$ e das capacidades de recolhimento requeridas associadas $K_{icr}$ $i \in I(cr)$	
$s$	tipos de sistemas de resposta para contenção/recuperação	$s \in S$
$s'$	tipos de sistemas de resposta para proteção	$s' \in S'$
$f_1$	instalações associadas ao conjunto $L_1(sicr)$	
$f_2$	instalações associadas ao conjunto $L_2(s'picr)$	

### VARIÁVEIS DE DECISÃO

$t_f$	nova capacidade a ser adicionada na instalação $f \in F$ .
$y_f$	será 1 se for estabelecida uma instalação nova na localidade $f$ ou expandida a capacidade de uma instalação $f$ já existente, caso contrário será 0.
$x_{fs}$	número de sistemas do tipo $s \in S$ a ser comprado e armazenado na instalação $f$
$a_{fs'}$	número de sistemas do tipo $s' \in S'$ a ser comprado e armazenado na instalação $f$
$z_{fsicr}$	número de sistemas do tipo $s \in S(icr)$ a serem despachados da instalação $f \in L_1(sicr)$ , para um ponto de risco $r \in R$ , num cenário $c$ , em um instante compreendido entre os instantes críticos $t_{(i-1)cr}$ e $t_{icr}$ , sendo $i \in I(cr)$ .

$n_{fs'picr}$  número de sistemas do tipo  $s'$   $\in S'(pi'cr)$  a serem despachados da instalação  $f \in L_2(s'picr)$  para a área sensível  $p \in P(cr)$ , associada a um ponto de risco  $r$ , num cenário  $c$ , em um instante compreendido entre os instantes críticos  $t_{(i-1)cr}$  e  $t_{icr}$ , sendo  $i \in I(cr)$ .

## PARÂMETROS

$M_f$  tamanho(capacidade) máxima, em  $m^3$ , da instalação  $f$  a ser construída/ expandida.

$D_{fs}$  número de sistemas existentes do tipo  $s$  armazenados em  $f$ .

$U_{fs'}$  número de sistemas existentes do tipo  $s'$  armazenados em  $f$ .

$d_s$  espaço requerido, em  $m^3$ , para armazenar um sistema do tipo  $s$ .

$l_{s'}$  espaço requerido, em  $m^3$ , para armazenar um sistema do tipo  $s'$ .

$t_{icr}$  instante crítico no qual uma capacidade  $K_{icr}$  deve ser despachada para o ponto de risco  $r$ , no cenário  $c$ .

$K_{icr}$  capacidade total de recolhimento requerida ( $m^3/h$ ) no tempo  $t_{icr}$ , no cenário  $c$ , no ponto de risco  $r$ .

$W_{sincr}$  capacidade de recolhimento ( $m^3/h$ ) do sistema do tipo  $s$  no ponto de risco  $r$ , num cenário  $c$ , no tempo  $t_{icr}$  que foi despachado no instante crítico  $t_{n_{cr}}$  ( $n < i$ ).

Obs: será considerado no modelo  $W_s = 20\% \times$  Capacidade de Recolhimento Nominal, como definido no PEI (Plano de Emergência Individual).

$tt_f$  tamanho (capacidade), em  $m^3$ , da facilidade  $f$  existente.

$QT_{picr}$  comprimento total das barreiras de proteção, em  $m$ , requerido em um instante crítico  $t_{icr}$ , proveniente dos sistemas de resposta  $s'$ , em uma área sensível  $p$ , devido a um derramamento  $r$ , num cenário  $c$ .

Obs: Tal requerimento é definido pelo usuário do modelo, função das características da área sensível (grau de sensibilidade, prioridade etc...) e estará sujeito à aprovação do órgão ambiental.

$Q_{s'}$  comprimento da barreira de proteção, em  $m$ , do sistema de proteção  $s'$ .

$B_f$  capacidade disponível na instalação  $f$ , em  $m^3$ .  $B_f = tt_f - \sum_s d_s D_{fs} - \sum_{s'} l_{s'} U_{fs'}$

- H horizonte de planejamento ( 1 a 3 anos ).
- $X_{cr}$  taxa média na qual derramamentos num cenário c ocorrem no ponto de risco r (número de derramamentos por ano).

### PARÂMETROS DE CUSTO

- $F_f$  Custo fixo para abrir uma instalação nova/expandir uma existente na localização f.
- $V_f$  Custo variável (por  $m^3$ ) para estabelecer/expandir a capacidade da instalação f
- $G_{fs}$  Valor Presente do custo de comprar/manter novos sistemas do tipo s, na localização f, num horizonte de planejamento de H anos.
- $E_{fs'}$  Valor Presente do custo de comprar/manter novos sistemas do tipo s', na localização f, num horizonte de planejamento de H anos.
- $CO_{fsicr}$  Valor Presente do custo de compor e operar sistemas do tipo s  $\in S(icr)$ , inicialmente armazenados em  $f \in L_1(sicr)$ , atuando em um cenário c, no ponto de risco r, a partir do instante  $t_{icr}$ .
- $CTO_{fsicr} = X_{cr} H CO_{fsicr}$ , Valor Presente do custo total esperado de compor e operar sistemas do tipo s, inicialmente armazenados em  $f \in L_1(sicr)$ , atuando em um cenário c, no ponto de risco r, no instante  $t_{icr}$ , considerando um horizonte de planejamento de H anos.
- $CO'_{fs'picr}$  - Valor Presente do custo de compor e operar sistemas do tipo s'  $\in S'(picr)$ , inicialmente armazenados em  $f \in L_2(s'picr)$ , atuando na área sensível p, associada ao cenário c, no ponto de risco r, a partir do instante  $t_{icr}$ .
- $CTO'_{fs'picr} = X_{cr} H CO'_{fs'picr}$ , Valor Presente do custo total esperado de compor e operar sistemas do tipo s'  $\in S'(picr)$ , inicialmente armazenados em  $f \in L_2(s'picr)$ , atuando na área sensível p, associada ao cenário c, do ponto de risco r, no instante  $t_{icr}$ , considerando um horizonte de planejamento de H anos.

É mostrada a seguir a função objetivo do problema seguido de suas restrições:

$$\min \sum_f F_f y_f + \sum_f V_f t_f + \sum_f \sum_s G_{fs} x_{fs} + \sum_f \sum_s E_{fs'} a_{fs'} + \sum_{f \in L_1(\text{sicr})} \sum_s \sum_i \sum_c \sum_r \text{CTO}_{fsicr} z_{fsicr} + \sum_{f \in L_2(\text{s'picr})} \sum_{s'} \sum_p \sum_i \sum_c \sum_r \text{CTO}'_{fs'picr} n_{fs'picr} \quad (3.1)$$

$$\text{sujeito a } t_f \leq y_f M_f \quad \forall f \in F \quad (3.2)$$

$$\sum_s d_s x_{fs} + \sum_{s'} l_{s'} a_{fs'} \leq t_f + B_f \quad \forall f \in F, s \in S, s' \in S' \quad (3.3)$$

$$\sum_{n=1}^i z_{fsncr} \leq x_{fs} + D_{fs} \quad \forall f \in L_1(\text{sicr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s \in S(\text{icr}) \quad (3.4)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_p n_{fs'pncr} \leq a_{fs'} + U_{fs'} \quad \forall f \in L_2(\text{s'picr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s' \in S'(\text{picr}), p \in P(\text{cr}) \quad (3.5)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_f \sum_s z_{fsncr} W_{sincr} \geq K_{icr} \quad \forall f \in L_1(\text{sicr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s \in S(\text{icr}) \quad (3.6)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_f \sum_s n_{fs'pncr} Q_{s'} \geq QT_{picr} \quad \forall f \in L_2(\text{s'picr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s' \in S'(\text{picr}), p \in P(\text{cr}) \quad (3.7)$$

$$y_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (3.8)$$

$$t_f \geq 0 \quad \forall f \in F \quad (3.9)$$

$$a_{fs} \geq 0 \quad \text{inteiro } \forall f \in F, s \in S \quad (3.10)$$

$$x_{fs} \geq 0 \quad \text{inteiro } \forall f \in F, s \in S \quad (3.11)$$

$$z_{fsicr} \geq 0 \quad \text{inteiro } \forall f \in L_1(\text{sicr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s \in S(\text{icr}) \quad (3.12)$$

$$z_{fsicr} \geq 0 \quad \text{inteiro, } \forall f \in L_2(\text{s'picr}), r \in R, c \in C(r), i \in I(\text{cr}), s' \in S'(\text{picr}), p \in P(\text{cr}) \quad (3.13)$$

A função objetivo do modelo (3.1) procura minimizar o valor presente do custo total que consiste no custo de estabelecer/expandir instalações, no custo de estabelecer/expandir capacidade de resposta, no custo de comprar/manter sistemas de resposta e no custo de compor/operar todos os sistemas para dado horizonte de planejamento.

As restrições podem ser interpretadas da seguinte forma: A restrição (3.2) limita o tamanho de uma nova instalação ou da expansão de uma instalação já existente por um limite superior  $M_f$ . Na restrição (3.2) o número de sistemas do tipo  $s$  e do tipo  $s'$  é limitado pela capacidade de armazenamento desta facilidade. A restrição (3.3) define que o número de sistemas  $s \in S(icr)$  que devem ser despachados da instalação  $f \in L1(sicr)$  para o ponto de risco  $r$ , em um cenário  $c$ , não deve exceder o número de sistemas  $s$  desta instalação. A restrição (3.4) define que o número de sistemas  $s' \in S'(picr)$  que devem ser despachados da instalação  $f \in L2(s'picr)$  para todas as áreas sensíveis  $p \in P(cr)$ , associadas ao ponto de risco  $r$ , em um cenário  $c$ , não deve exceder o número de sistemas  $s'$  desta instalação. A restrição (3.5) define que a quantidade de sistemas  $s \in S(icr)$ , dados por  $zfsicr$ , que serão despachados das instalações  $f \in L1(sicr)$ , deverão atender aos requerimentos de recolhimento estipulados para cada instante crítico  $i$ , de cada cenário  $c$ , de cada ponto de risco  $r$ . A restrição (3.6) define que a quantidade de sistemas  $s' \in S'(picr)$ , dados por  $nfs'picr$ , que serão despachados das instalações  $f \in L2(s'picr)$ , deverão atender aos requerimentos de proteção estipulados para cada área sensível  $p$ , associada a cada cenário  $c$ , de cada ponto de risco  $r$ , em cada instante crítico  $i$ . As restrições (3.7 até 3.13) definem que  $Y_f$  deverá ser binário e  $xfs$ ,  $afs'$ ,  $zfsicr$  e  $nfs'picr$  deverão ser inteiros positivos e  $T_f$  deverá ser maior ou igual a 0.

O problema de localização acima descrito é um modelo de programação inteira geral pertencendo à categoria dos problemas NP-Hard, exigindo um tempo computacional proibitivo, para a solução exata por método enumerativo. Métodos heurísticos foram propostos, então, para abordar o problema.

## **4 – ESTUDO DE CASO DO PROJETO DE PERFURAÇÃO NA BACIA DE CAMAMU-ALMADA**

### **4.1. Contextualização do Estudo de Caso**

O projeto de perfuração petrolífera escolhido para esse estudo foi da segunda campanha exploratória da Companhia El Paso no bloco BM-CAL-4 na Bacia de Camamu-Almada em 2007. A empresa já havia feito uma campanha de perfuração exploratória anteriormente no mesmo. Entretanto, entre as duas últimas campanhas, houve uma sensível mudança nos critérios do órgão ambiental para o licenciamento da atividade, tanto nos requisitos ambientais gerais e principalmente nos de preparação de resposta a um potencial derramamento de óleo.

Um dos fatores que contribuíram para tornar o processo de licenciamento da segunda campanha de perfuração mais complexo foi a consideração inicial de que a viabilidade do projeto de perfuração dependia também da viabilidade do projeto de produção. A nova visão com relação a sensibilidade ambiental da região pelo órgão licenciador também foi evidenciada em discussões com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), responsável pela seleção dos Blocos a serem licitados para concessões exploratórias petrolíferas, que resultou no fato que, a partir da 7ª Rodada de Licitações não foram mais oferecidos blocos na região. Entretanto, esses e os demais blocos já licitados prosseguiram com suas operações, incluindo o BM-CAL-4.

Os operadores que possuem blocos exploratórios na Bacia de Camamu são a Petrobras (CAL-M-372, CAL-M-248, CAL-M-312, CAL-M-120, CAL-M-186, CAL-M-188 e BCAM-40), Statoil (CAL-M-3, CAL-M-58, CAL-M-60 e CAL-M-122), Devon (CAL-M-314), Eni Oil (CAL-M-374) e a El Paso (BM-CAL-4). Sendo que desses, somente a El Paso e a Petrobrás já perfuraram na região, a El Paso em 2003 e 2007, tendo descoberto três campos (Camarão, Pinaúna e Sardinha) e a Petrobras em um campo de gás ao norte do projeto da El Paso, o Campo de Manati. Antes disso, no início dos anos 80, a Shell já havia perfurado um poço exploratório dentro dos limites deste bloco, em época que não havia licenciamento ambiental no Brasil. Ou seja, a julgar pela quantidade

de blocos “ativos” nesta bacia, existe uma boa possibilidade de que mais operações de exploração de petróleo sejam conduzidas na área, naturalmente dependente do sucesso de outras campanhas exploratórias.

No projeto da El Paso, a segunda campanha de perfuração petrolífera no bloco BM-CAL-4 era inicialmente composta por quatro poços, sendo um firme e três de contingência conforme na Tabela 4.1.

Localção	Lâmina d'água	Distância da Costa
Cacau	18 m	10,5 km / 7,5 km*
Açaí	27 m	12,5 km / 9,0 km*
Cajá	30 m	10,5 km / 7,0 km*
Dendê	41 m	7,5 km

\* Distância de Queipe (ilha localizada próximo à entrada da Baía de Camamu)

**Tabela 4.1 – Poços planejados para o projeto de perfuração petrolífera em estudo**

Cada um destes poços tem uma duração estimada de 30 a 45 dias de operação. A plataforma utilizada nessa operação é a THE-156, ilustrada na Figura 4.1. O início da operação foi em Fevereiro de 2007, sendo que o período previsto inicialmente era Março de 2006, após um longo processo de licenciamento ambiental (1 ano e 8 meses). Ao final, a operação durou 9 meses e 2 poços foram construídos.



**Figura 4.1 – Plataforma THE 156 usada no projeto (RCA, 2005)**

O Bloco BM-CAL-4 está localizado na parte sul do estado da Bahia, próximo a algumas localidades ambientalmente sensíveis famosas como Morro de São Paulo e as Baías de Camamu e de Todos os Santos. Todas essas são vulneráveis a vazamento de óleo de grandes proporções segundo as modelagens matemáticas de derramamento de óleo nos cenários de verão e inverno. Durante o verão a corrente predominante na área é de Norte para Sul e no inverno, no sentido oposto. Ou seja, a Baía de Todos os Santos seria atingida no cenário de inverno. A baía de Camamu pode ser atingida em ambos os casos, dependendo da maré.

#### **4.1.1. Caracterização Ambiental da Área**

Para compreender o grau de sensibilidade ambiental da área de influência do projeto em questão, analisaremos brevemente uma caracterização ambiental da área da bacia de Camamu-Almada onde esse projeto é realizado. Mais especificamente a área de influência indireta deste empreendimento composta pela faixa litorânea que se estende desde a Baía de Todos os Santos/BA, no município de Salvador, até Ilhéus/BA. De acordo com os resultados da modelagem matemática de derramamento de óleo no mar realizada, esta área foi compartimentada em 3 setores, conforme mostrado na figura 4.2, pelo critério do tempo de toque de óleo na costa. O Setor II, contíguo a locação da plataforma, corresponde à área onde o óleo toca a costa em menos do que 24 horas.

Os municípios incluídos em cada setor são os que se seguem:

- (i) **Setor I (norte)** abrange o município de Salvador, os municípios do Recôncavo Baiano, a Ilha de Itaparica até o município de Jaguaripe;
- (ii) **Setor II** abrange a região compreendida pelos municípios de Valença, Cairú, Nilo Peçanha, Taperoá, Ituberá, Igrapiúna, Camamu e Maraú;
- (iii) **Setor I (sul)** abrange os municípios de Itacaré, Uruçuca e Ilhéus.

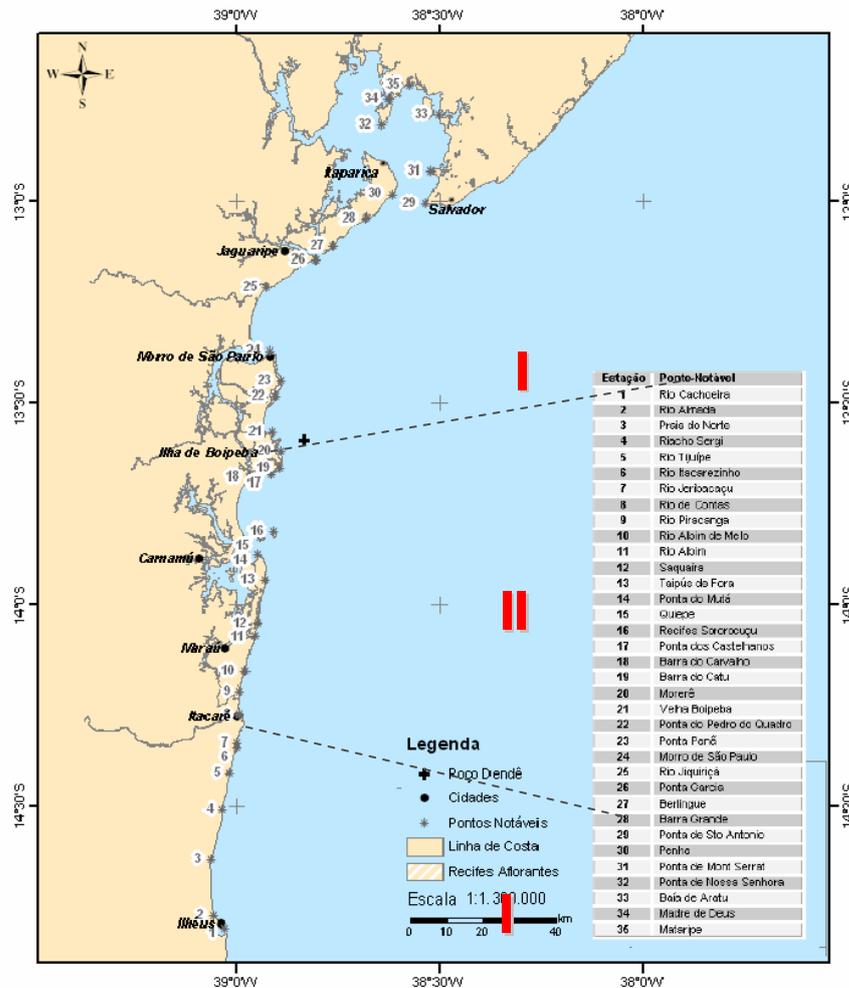


Figura 4.2 – Divisão em setores da área de influência indireta da atividade (RCA, 2005)

A Área de Influência indireta está inserida na denominada Região Econômica Litoral Sul da Bahia, equivalente a uma área territorial de 5.025,5 km<sup>2</sup>, representando cerca de 19,9% da área total da região Litoral Sul e cerca de 4,5% do território do estado. Com base nas informações do Censo 2000 – o mais recente levantamento censitário realizado pelo IBGE - a área reunia 207.185 habitantes, o correspondente a 15,2% e a 1,6% da população do Litoral Sul e do estado respectivamente.

A região apresenta ecossistemas de extrema relevância, abrangendo trechos constituídos por praias, restingas e lagunares, e é considerada privilegiada por apresentar também ambientes de estuários, manguezais, pradarias de algas e recifes coralinos que proporcionam enriquecimento do ambiente marinho. A presença destes ambientes de forma integrada

proporciona, ainda, uma biodiversidade marinha significativa (RCA, 2005). Todos sensíveis a um derramamento de óleo.

Esses ambientes encontram-se protegidos por 30 unidades de conservação, que abrangem a faixa costeira que se estende desde Baía de Todos os Santos/Salvador (BA) até Ilhéus (BA), das quais 10 são RPPNs – Reservas Particulares do Patrimônio Natural.

A atividade turística é uma das grandes vocações da região, tendo em vista as lagoas, barras de rios, piscinas de corais, mangues e coqueirais. A pesca artesanal também é importante em águas rasas.

Do ponto de vista de resposta a derramamento de óleo, é preciso considerar que as áreas mais sensíveis da Área de Influência devem ser protegidas, ou seja, recursos de resposta devem ser alocados para pontos específicos da costa.

#### **4.2. O Plano de Emergência Individual Aprovado para o Projeto BM-CAL-4**

Antes de aplicarmos o modelo para o caso em questão, apresentaremos a seguir o plano de emergência proposto pelo empreendedor e aprovado pelo órgão ambiental para esse projeto durante o processo de licenciamento de sua atividade de perfuração exploratória de petróleo na Bacia de Camamu-Almada.

O Plano de Emergência proposto divide-se em 5 níveis de proteção de acordo com o tempo decorrido de vazamento até que os recursos daquele nível estejam disponíveis para serem usados. Como vimos na apresentação do problema de derramamento de óleo, o tempo é um fator importante para a efetividade de uma técnica de resposta, logo os primeiros níveis são também os que geram uma maior proteção ambiental, pois evitam o escalonamento da emergência.

O primeiro nível de resposta é o chamado “cerco fixo”. O cerco fixo nada mais é do que a instalação de barreiras de proteção fixadas por poitas ao redor da plataforma em forma de helicoidal. A proposta do cerco é conter

imediatamente qualquer vazamento de óleo que ocorra na superfície, ou que venha à tona nas proximidades da plataforma.



**Figura 4.3: Foto aérea do cerco fixo instalado ao redor da plataforma (RCA, 2005)**

A instalação desse cerco gerou grande debate entre os especialistas da área quanto a sua viabilidade técnica e o benefício proporcionado por ele. Uma das principais desvantagens do cerco fixo é o risco ao qual as pessoas que o desmontam se expõem quando as condições de vento e corrente superam o limite estabelecido para sua manutenção. O principal benefício apontado por seus defensores é a resposta imediata, inclusive durante o período noturno.

O segundo nível do plano proposto trata da resposta em alto-mar. Ou seja, imediatamente próximo à locação da plataforma, de forma a conter eventuais fugas do cerco fixo. Esse nível foi implementado com barcos dedicados a esse propósito os quais ficam disponíveis na locação, e outros que se deslocariam até lá no caso de um derramamento para fazer a operação de contenção e recolhimento do óleo, além de recolher também o que fosse contido no próprio cerco fixo. Essas embarcações seriam utilizadas então para formar configurações “U” e “J” para contenção e recolhimento do óleo em alto-mar.

O nível III é o de resposta próximo a costa. Para esse tipo de resposta, as embarcações utilizadas eram de porte bem menor do que as do nível

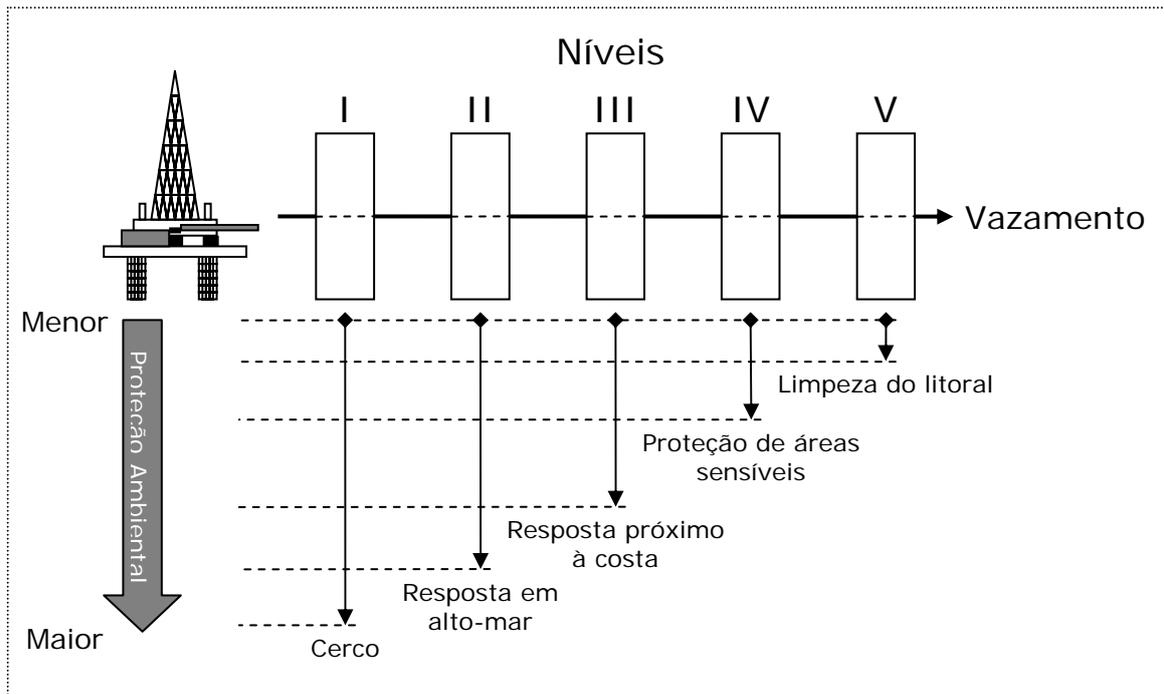
anterior. Esse nível de resposta inclui também a contenção e o recolhimento do óleo, mas principalmente o desvio da mancha de locais mais sensíveis para praias de sacrifício. Incluindo também a proteção a entrada de baías. Apesar de tratar-se de águas mais próximas à costa e teoricamente mais tranquilas, existem regiões de correntes fortes e que devem ser protegidas onde se fazem necessários equipamentos especiais como a barreira “Current buster” que é capaz pelo seu formato e sua composição de operar em condições de corrente maiores que as barreiras tradicionais.

Vale ressaltar que nesse nível e nos próximos que seguem, os recursos não deveriam ser deslocados para o ponto de risco (plataforma) e sim para pontos a serem guarnecidos próximos a costa ou até mesmo na costa. Isso é uma mudança significativa nas premissas do modelo de Iakavou que precisa ser adaptado a essa realidade.

No quarto nível, chamado de proteção de áreas sensíveis, os recursos devem ser deslocados para proteger as áreas sensíveis potencialmente atingidas para cada tipo de cenário, incluindo a instalação de barreiras absorventes para impedir a chegada do óleo na costa e preparação de praias de sacrifício com barreiras costeiras.

O quinto e último nível do plano de emergência trata da limpeza de costa. Para esse tipo de resposta deve-se considerar a alocação de equipes e materiais para os pontos aonde o óleo chegaria. Os equipamentos de limpeza de praia são normalmente considerados como “kits”. Esses kits contêm todo o material básico de limpeza como equipamentos de proteção individual, vassouras e rodos, sacos plásticos, bombas, mangueiras, etc. Além disso, haviam transportes de areia, como quadriciclos e caminhões tanque para o armazenamento temporário do óleo recolhido.

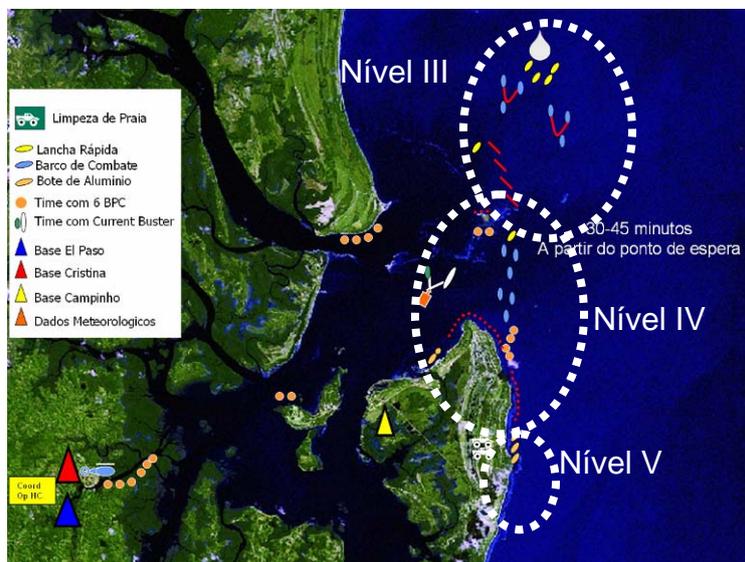
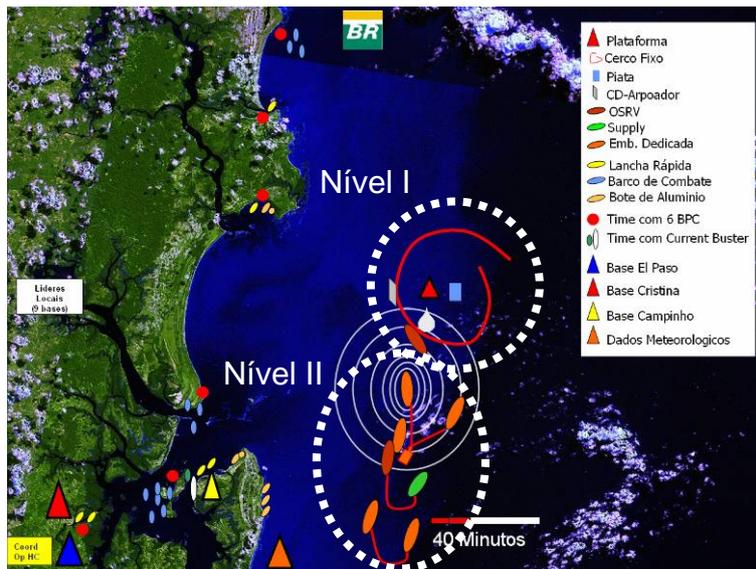
Os cinco níveis do plano podem ser visualizados na figura 4.4:



**Figura 4.4 – Os cinco níveis de resposta a derramamento de óleo no plano de emergência individual aprovado para a atividade. (RCA, 2005)**

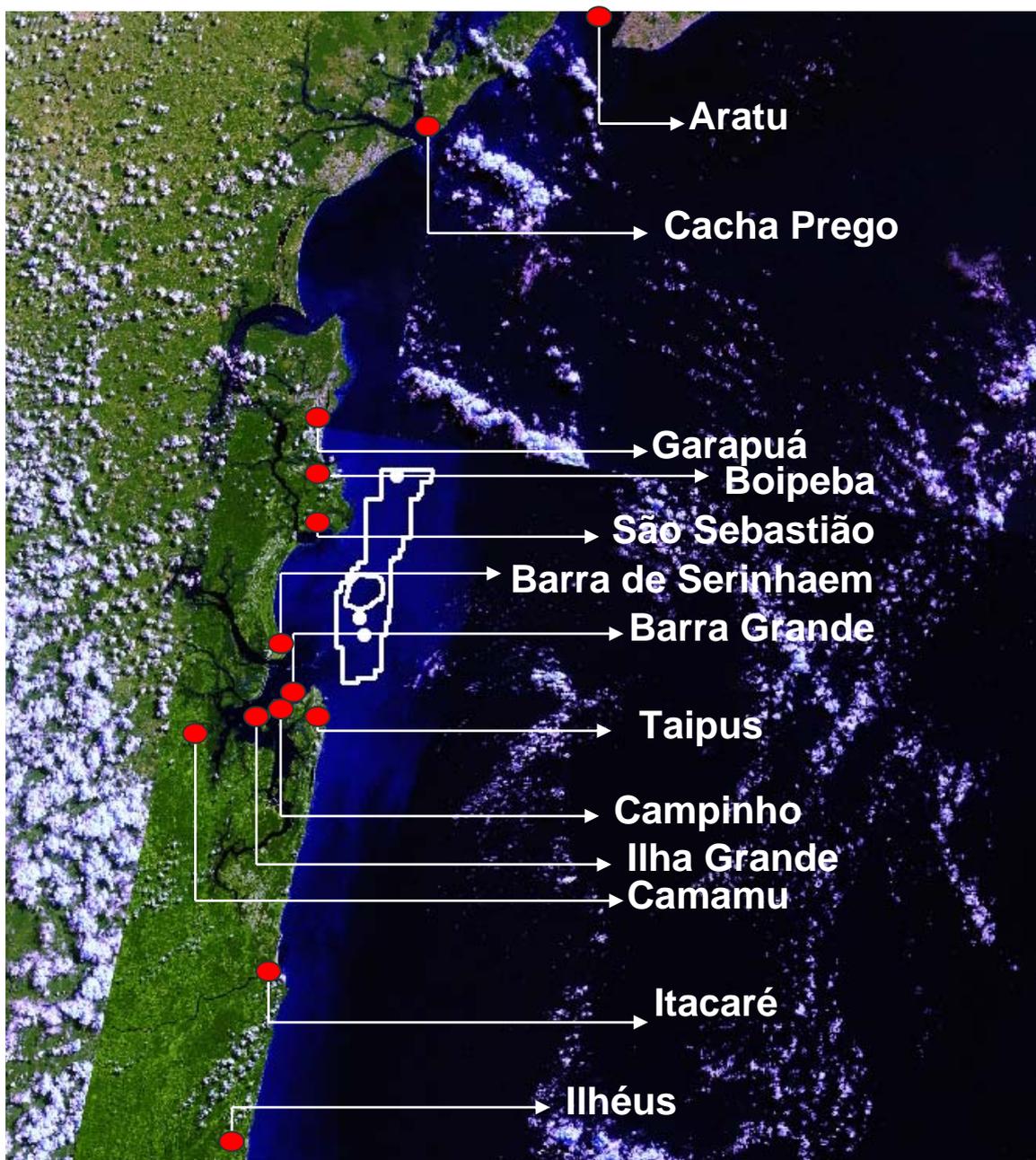
O projeto possui dois cenários básicos, o de inverno e de verão. A diferença entre estes cenários é a corrente predominante que é para o norte e para o sul respectivamente. Com isso, as áreas sensíveis potencialmente atingidas são completamente distintas e determinadas a partir de modelagens matemáticas que determinam a probabilidade de toque da mancha de óleo em cada área sensível e o tempo de pior caso, ou seja, o tempo mínimo para isso, além de indicar o comportamento da mancha no mar.

A figura 4.5 ilustra esse plano para o cenário de verão destacando os diferentes níveis. O primeiro nível, como vimos, não requer qualquer mobilização por se tratar somente da contenção realizada pelo cerco fixo. Nessa etapa inicia-se todo o acionamento das diferentes instalações de apoio e da coordenação do plano, além do início da operação de recolhimento do óleo contido na barreira pelas embarcações dedicadas de combate a derramamento de óleo.



**Figura 4.5 – Ilustração dos 5 níveis de resposta no mapa da locação para o cenário de verão (RCA, 2005)**

Para implementar o plano de emergência individual aprovado, o empreendedor armazena seus equipamentos de resposta em 13 instalações de apoio distribuídas ao longo da costa conforme ilustrado na Figura 4.6.



**Figura 4.6 – Instalações de apoio existentes onde são armazenados os equipamentos de resposta para atendimento do plano de emergência. (RCA, 2005)**

O inventário de embarcações e equipamentos para atendimento aos 5 níveis de proteção do plano de emergência individual aprovado que é distribuído nas 13 instalações de apoio é:

- 8 x 200m de barreira RO-Boom 2000 (total de 1600m)
- 5 x 200m de barreira absorvente (total de 1000m)
- 1 Barreira do tipo current buster

- 3 skimmers Terminator (125 m<sup>3</sup>/h)
- 1 skimmer Tarantula (250 m<sup>3</sup>/h)
- 3 tanques de armazenamento temporário
- 12 barcos de proteção de costa
- 1 lancha rápida
- 1 bote inflável
- 4 botes de alumínio
- 27 barcos de combate
- 2 quadriciclos
- 1 kit de material de limpeza de costa
- 1 equipamento de lavagem de baixa pressão e armazenamento

Esses equipamentos seriam suficientes para atender os cenários de inverno e verão para o projeto em questão. A principal diferença entre eles são as áreas sensíveis que precisariam ser protegidas, pois os recursos deslocados até o ponto de risco (plataforma) seriam os mesmos para ambos os casos.

Exclui-se deste inventário todos os recursos que não requerem alocação e são obrigatórios porque esses não são relevantes para o problema de alocação estratégica desses equipamentos como, por exemplo, as embarcações dedicadas e o cerco fixo que devem estar na locação em tempo integral.

#### **4.3. Modelo Proposto por Iakovou, Ip, Douligieris e Korde (1996).**

##### **4.3.1. Objetivo e Hipóteses Fundamentais.**

Para este trabalho utilizamos como base de desenvolvimento o modelo estratégico proposto por Iakovou, Douligieris, Ip e Korde (1996). Este modelo determina a localização ótima, o número e o tipo de equipamentos a serem armazenados nas diferentes instalações de apoio para responder aos derramamentos de óleo, considerando que os equipamentos poderão ser despachados a partir dessas diferentes localizações (instalações de armazenamento) para responder a um derramamento de óleo atendendo um

tempo mínimo especificado. Segundo os autores, desta forma é evitado o armazenamento desnecessário em múltiplas instalações de equipamentos que tenham pequena probabilidade de uso.

Este modelo trata o problema como determinístico, podendo os dados que caracterizam um dado cenário ser obtidos a partir de registros históricos e/ou a partir da análise de especialistas e modelagens. Deste modo um dado cenário poderá ser caracterizado por uma combinação considerando volume de derramamento de pior caso, tipo de óleo derramado, faixa característica retratando a condição de tempo/mar, podendo-se considerar também a temperatura média característica, etc. O modelo também assume que a probabilidade de ocorrência de dois ou mais eventos de derramamento simultâneos seja desprezível.

Neste modelo, para cada possível cenário identificado, é necessário definir certos parâmetros de entrada, tais como: 1) o número de equipamentos requeridos (por tipo) para resposta em um dado ponto de risco para cada cenário de derramamento identificado 2) o tempo de viagem esperado para transportar determinado equipamento de um local de armazenamento para um ponto de demanda (ponto de risco) em um determinado cenário 3) Os possíveis locais das instalações de armazenamento dos equipamentos 4) A capacidade máxima de armazenamento destas instalações por tipo de equipamento.

#### **4.3.2. Formulação do Modelo.**

O problema acima descrito trata-se de um problema de Localização-Alocação com restrição de capacidade, podendo ser modelado como um problema de programação linear inteira geral, como é descrito a seguir:

Notação:

Conjuntos:

I Conjunto finito das locações de armazenamento de equipamentos

J Conjunto finito dos tipos de equipamentos

K Conjunto dos locais de acidentes (pontos de risco)

S Conjunto finito dos tipos de acidentes (cenários)

Parâmetros do modelo:

$f_i$  Custo fixo para abrir uma instalação na locação  $i$

$c_{ij}$  Custo operacional do armazenamento de equipamentos do tipo  $j$  na locação da instalação  $i$

$k_j$  Custo unitário por unidade de tempo para o equipamento do tipo  $j$ .

$t_{ijk}$  Tempo de viagem para o equipamento do tipo  $j$  ser transportado da locação da instalação  $i$  para o local do acidente  $k$ .

$\alpha_{jks}$  Número de equipamentos do tipo  $j$  requeridos no local do acidente  $k$  para cobrir um cenário de acidente do tipo  $s$ .

$M_{ij}$  Capacidade limite para equipamentos do tipo  $j$  a serem armazenados na instalação  $i$ .

$T$  Tempo crítico para responder a um acidente.

$F_{jk} = \{i: t_{ijk} \leq T\}$ ; o conjunto de todas as locações das instalações  $i$  nos quais os equipamentos do tipo  $j$  são capazes de atender a um derramamento de óleo no local do acidente  $k$  em um tempo inferior ao crítico  $T$ .

Variáveis do modelo:

$x_{ij}$  Número de equipamentos do tipo  $j$  que deverá ser armazenado na locação da instalação  $i$ .

$z_{ijks}$  Número de equipamentos do tipo  $j$  a serem despachados a partir da locação da instalação  $i$  para o local do acidente  $k$  em um cenário de acidente do tipo  $s$ .

$y_i$  será 1 ( $y_i=1$ ) se a locação da instalação  $i$  for selecionada, será 0 ( $y_i = 0$ ) caso contrário.

Função objetivo:

$$\text{Min} \left\{ \sum_i f_i y_i + \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_s k_j t_{ijk} z_{ijks} \right\} \quad (4.1)$$

sujeito a

$$x_{ij} \leq M_{ij} y_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in F_{jk}} z_{ijks} \geq \alpha_{jks} \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (4.3)$$

$$z_{ijks} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (4.4)$$

$$x_{ij}, z_{ijks} \geq 0 \quad \text{inteiros}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (4.5)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

A função objetivo deste modelo (4.1) procura minimizar a soma do custo de instalação da base, do custo operacional do armazenamento dos equipamentos nestas instalações e dos custos de transporte das instalações aos locais dos acidentes.

Restrições do Modelo:

A restrição (4.2) garante que o armazenamento do equipamento do tipo  $j$  na instalação da facilidade  $i$  só será permitido se o mesmo estiver aberto, onde  $M_{ij}$  é um limite superior conhecido para  $x_{ij}$ .

A restrição (4.3) garante que uma dada demanda pelo equipamento do tipo  $j$  para um cenário de acidente do tipo  $s$  num ponto de risco  $k$  tem que ser coberta dentro de um tempo crítico a partir da instalação  $i$  (uma vez que as locações das instalações  $i$  considerados terão que pertencer necessariamente ao conjunto  $F_{jk}$ , atendendo assim à especificação de tempo máximo de resposta requerido). Vide definição de  $F_{jk}$  em parâmetros do modelo.

A restrição (4.4) garante que o máximo número de equipamentos do tipo  $j$  em um cenário de acidente do tipo  $s$  a ser despachado a partir da instalação  $i$  para o ponto de risco  $k$  não excederá a capacidade a ser disponibilizada na instalação  $i$ .

Restrições (4.5) e (4.6) impõem que  $x_{ij}$  e  $z_{ijks}$  deverão ser inteiros positivos e  $y_i$  deverá ser binário.

#### **4.3.3. Aplicação do Modelo e Técnica de Solução Proposta pelos autores.**

O problema acima modelado trata-se de um problema de localização-alocação capacitado com variáveis inteiras da categoria dos problemas não polinomiais “difíceis” (NP-Hard). Os autores propuseram uma solução aproximada para este modelo através da utilização do algoritmo Branch and Bound em um problema de Programação Linear Misto Inteira onde as variáveis inteiras  $x$  e  $z$  serão relaxadas e as variáveis  $y$  serão mantidas binárias, diminuindo assim o esforço computacional.

Observam os autores que este modelo relaxado é do tipo de transporte (“transportation-like”) e a sua solução provavelmente possuirá valores inteiros ou próximos de inteiros (somente poucas variáveis serão fracionárias). Complementa que neste último caso as soluções fracionárias poderão ser arredondadas para se obter uma solução próxima do ótimo.

Os autores do modelo fizeram uma aplicação deste algoritmo na Costa da Flórida, mas ressaltam que mais pesquisas devem ser feitas para testar a sua validade devido à falta de consistência e padronização entre as bases de dados providas pelo excesso de agências estatais e federais existentes nos Estados Unidos.

#### **4.4. Adaptação do Modelo para Aplicação no Projeto BM-CAL-4**

Escolheu-se o modelo de Iakovou como base para o desenvolvimento por se tratar de águas rasas próximo a costa, onde a chegada “escalonada” de

novos recursos como prevê a legislação aplicável não seria satisfatória, pois o óleo já poderia ter atingido ou estar prestes a atingir a costa. Seria como dizer que, para essa aplicação, o nível 3 de pior caso segundo a Resolução CONAMA 293 deveria estar disponível em 1 hora.

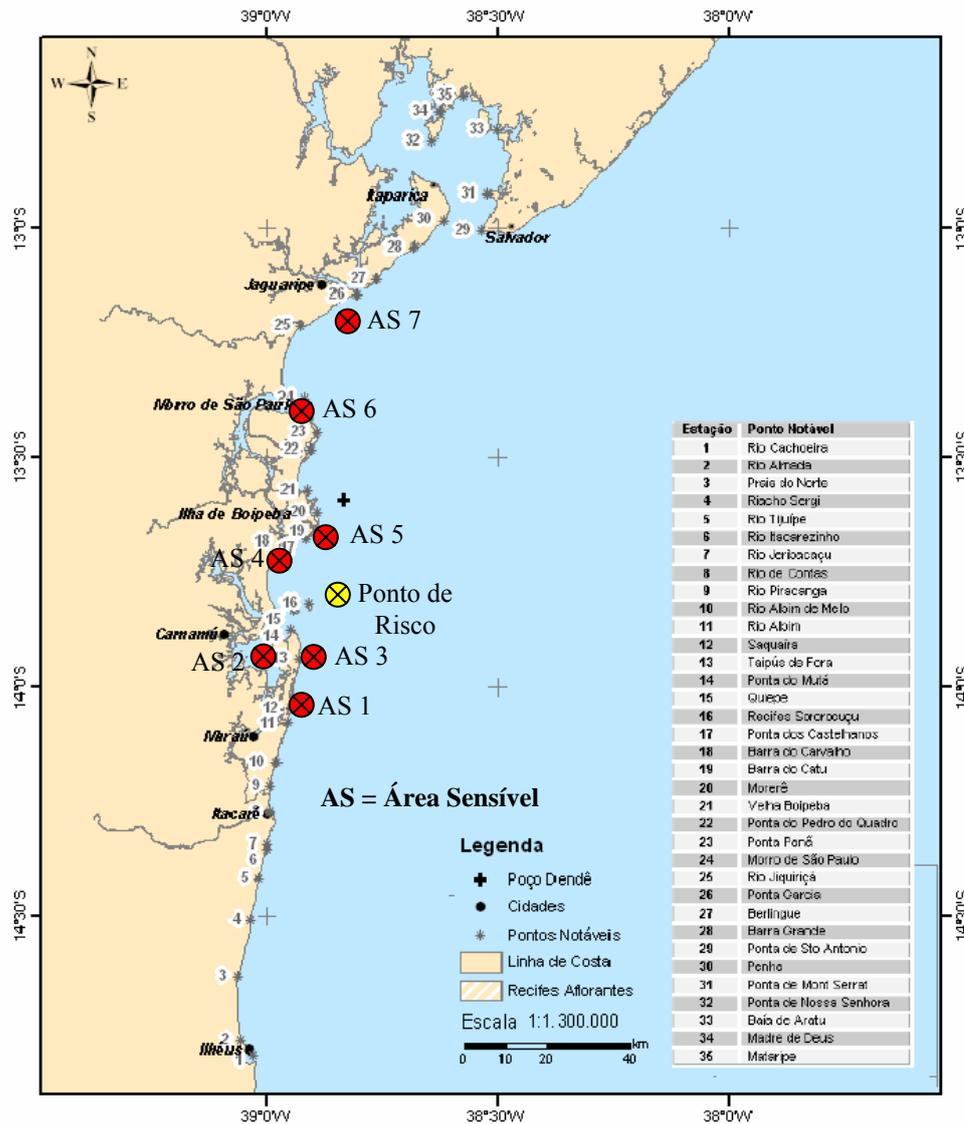
Outra particularidade deste modelo que facilita sua aplicação neste caso é que ele prevê que os recursos de resposta são dados. Isso é bastante conveniente para esse caso onde a quantidade de recursos foi definida durante o processo de licenciamento da atividade. A aplicação deste modelo fica simplificada em certos aspectos para essa aplicação por se tratar de um único tipo de óleo e uma única condição de mar predominante normalmente favorável.

Entretanto a aplicação direta do modelo proposto por Lakavou não atende, pois ele não considera a proteção de áreas sensíveis. Tradicionalmente, o modelo de Lakavou, e a maioria dos modelos desse tipo de problema, tendem a direcionar os recursos em seus cálculos para o ponto do acidente ou ponto de risco. Entretanto, para o caso do projeto em questão, a estratégia consiste também em proteger as áreas sensíveis da costa.

Para implementar isso, definiu-se as áreas sensíveis e as praias de sacrifício como áreas de risco também. Apesar de não apresentarem risco, quando definidos assim o modelo aloca recursos para as suas locações. Entretanto, como o modelo de Lakavou considera que cada acidente ocorre sozinho (probabilidade de ocorrência de eventos simultâneos é nula) alterou-se o modelo para considerar o somatório de todos os pontos de risco na restrição que define os recursos necessários por ponto de risco.

Desta forma o modelo aloca os recursos especificados na demanda por ponto de risco em todos eles (seja o ponto de risco real, a plataforma, ou as áreas sensíveis).

A figura 4.7 mostra o mapa da região com a identificação das áreas sensíveis informadas ao modelo como pontos de risco.



**Figura 4.7 – Áreas sensíveis (vermelho) e plataforma (amarelo)**

A outra adaptação necessária ao modelo de lakavou para implementação nesse estudo de caso foi a restrição (4.2) que determina um limite para a alocação por tipo de equipamento em cada localidade. No caso estudado, as instalações de apoio não têm restrição quanto ao tipo de equipamento a ser alocado e sim quanto à quantidade de equipamentos possíveis de serem armazenadas. Por isso, estimou-se um tamanho unitário (volume médio) que seria ocupado por cada equipamento e a capacidade modular média das instalações de apoio.

Com isso a formulação do modelo passou a ser:

$$\text{Min} \left\{ \sum_i f_i y_i + \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_s k_j t_{ijk} z_{ijks} \right\} \quad (4.1)$$

sujeito a

$$\sum_j x_{ij} \leq 12 \quad \forall i \in I \quad (4.2 A)$$

$$x_{ij} \leq M_{ij} y_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in F_{jk}} z_{ijks} \geq \alpha_{jks} \quad \forall j \in J, k \in K, s \in S \quad (4.4)$$

$$\sum_k z_{ijks} \leq x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (4.7)$$

$$x_{ij}, z_{ijks} \geq 0 \quad \text{int}, \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S \quad (4.5)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

#### 4.4.1. Informações de Entrada do Modelo

Nessa seção, analisaremos os dados que devem ser informados de entrada ao modelo e como os mesmos foram obtidos ou calculados para torná-los o mais próximo do real possível.

Inicialmente, foram definidas as locações para instalações de apoio candidatas, no caso, todas as instalações existentes para que o modelo selecione as realmente necessárias para a alocação e o armazenamento desses equipamentos minimizando o custo total. Nesse caso, sabemos que a opção de manter todas abertas é uma solução viável do problema (situação atual). A partir de um mapa em escala da região com as localizações da plataforma, das áreas sensíveis e das instalações de apoio reais (candidatas no modelo) determinaram-se as coordenadas de cada uma delas.

A outra informação de entrada necessária ao modelo são os equipamentos que devem ser deslocados para cada ponto de risco, ou seja, uma matriz de demanda. Para isso, analisando o Plano de Emergência aprovado em seus 5 níveis, determinou-se que equipamentos eram

necessários em quais localidades para a implementação da resposta necessária. Ou seja, a relação e quantidade de equipamentos necessários para cada área de risco para os cenários de inverno e verão. A tabela 4.2 mostra a matriz de demanda para os cenários de inverno e verão obtidos a partir do plano e informados ao modelo alterado.

A variável PR\_1 é o ponto de risco / plataforma, PR\_AS\_1.1, PR\_AS\_1.2, PR\_AS\_1.3, PR\_AS\_1.4, PR\_AS\_2, PR\_AS\_3 e PR\_AS\_4, correspondem às áreas sensíveis de 1 a 7, respectivamente.

### CENÁRIO DE VERÃO

	PR_1	PR_AS_1.1	PR_AS_1.2	PR_AS_1.3	PR_AS_1.4	PR_AS_2	PR_AS_3	PR_AS_4
Barreira Ro-Boom (200m)	0	4	0	4	0	0	0	0
Barreira Absorvente	0	1	0	4	0	0	0	0
Barreira Current Buster	0	0	1	0	0	0	0	0
Skimmers Terminator (125 m <sup>3</sup> /h)	0	0	1	1	0	0	0	0
Skimmers Tarântula (250 m <sup>3</sup> /h)	0	0	0	0	0	0	0	0
Tanque 5000 m <sup>3</sup>	0	0	0	1	0	0	0	0
Barco Proteção de Costa	0	0	6	0	6	0	0	0
Lancha Rápida	0	0	0	0	1	0	0	0
Bote Inflável	0	1	0	0	0	0	0	0
Bote Alumínio	0	0	0	4	0	0	0	0
Barcos de Combate	6	9	6	6	0	0	0	0
Quadriciclo	0	0	0	2	0	0	0	0
Material de limpeza	0	0	0	1	0	0	0	0
Equipamento de limpeza	0	0	0	1	0	0	0	0

### CENÁRIO DE INVERNO

	PR_1	PR_AS_1.1	PR_AS_1.2	PR_AS_1.3	PR_AS_1.4	PR_AS_2	PR_AS_3	PR_AS_4
Barreira Ro-Boom (200m)	2	0	0	0	0	0	0	4
Barreira Absorvente	0	0	0	0	0	3	1	0
Barreira Current Buster	0	0	0	0	0	0	1	0
Skimmers Terminator (125 m <sup>3</sup> /h)	1	0	0	0	0	0	1	1
Skimmers Tarântula (250 m <sup>3</sup> /h)	1	0	0	0	0	0	0	0
Tanque 5000 m <sup>3</sup>	2	0	0	0	0	0	0	1
Barco Proteção de Costa	0	0	0	0	0	6	6	0
Lancha Rápida	0	0	0	0	0	0	0	1
Bote Inflável	0	0	0	0	0	0	0	0
Bote Alumínio	0	0	0	0	0	0	0	4
Barcos de Combate	6	0	0	0	0	9	6	6
Quadriciclo	0	0	0	0	0	0	0	1
Material de limpeza	0	0	0	0	0	0	0	1
Equipamento de limpeza	0	0	0	0	0	0	0	1

**Tabela 4.2 – Matriz de demanda para os cenários de inverno e verão**

O custo de manutenção mensal de cada instalação (aluguel e pessoal) também é necessário ao modelo. Para determinação deste custo, foi solicitada a empresa responsável pelos equipamentos de resposta a derramamento de óleo que forneceu um valor aproximado baseado no tipo de cada instalação.

A maioria das instalações são “containers” com os equipamentos que são alocados dentro de colônias de pescadores da região para os quais uma mensalidade é paga. Outras instalações maiores, porém, possuem armazéns fixos e têm custo associado maior, pois têm custo formal de aluguel e pessoal. Como os custos de todas as instalações são mensais todos os outros custos foram normalizados para esse período. A Tabela 4.3 mostra todos os custos associados a cada uma das instalações.

<b>Instalação</b>	<b>Custo Mensal</b>
1	R\$ 1000,00
2	R\$ 300,00
3	R\$ 1000,00
4	R\$ 300,00
5	R\$ 1000,00
6	R\$ 300,00
7	R\$ 300,00
8	R\$ 300,00
9	R\$ 300,00
10	R\$ 300,00
11	R\$ 300,00
12	R\$ 300,00
13	R\$ 3000,00

*Tabela 4.3 – Custo mensal por Instalação de Apoio*

A outra componente dos custos que deve ser informada ao modelo na composição do custo total da solução é o de manutenção e operação dos equipamentos. Para estimar esse custo, novamente com auxílio da empresa responsável pelos equipamentos, foi aproximada a quantidade de horas de técnicos necessárias por mês para manutenção de cada tipo de equipamento. O custo de hora do técnico também foi aproximado como o mesmo para todas as unidades. Assim obteve-se os valores resumidos na Tabela 4.4.

<b>Equipamento</b>	<b>Custo Mensal</b>
1	R\$ 80,00
2	R\$ 100,00

<b>Equipamento</b>	<b>Custo Mensal</b>
3	R\$ 50,00
4	R\$ 200,00
5	R\$ 200,00
6	R\$ 80,00
7	R\$ 350,00
8	R\$ 350,00
9	R\$ 350,00
10	R\$ 350,00
11	R\$ 350,00
12	R\$ 250,00
13	R\$ 30,00
14	R\$ 200,00

**Tabela 4.4 – Custo mensal de manutenção por tipo de Equipamento**

A terceira e última componente do custo que deve ser informada como dado de entrada ao modelo é o custo de transporte. Para essa componente a determinação do custo de forma verossímil é complicada, pois varia enormemente de acordo com a embarcação que será utilizada para transportar cada equipamento e não é possível *a priori* saber que embarcação levaria cada equipamento para as locações.

Por isso, foi determinado o consumo médio de uma embarcação de porte médio entre as existentes no plano. Foi estimado o custo do diesel marítimo como sendo o mesmo em toda região e a distância entre as instalações e os pontos de risco. Como esse custo foi aproximado homogêneo ele não seria determinante para escolha da “abertura” ou não de uma instalação.

Outras informações de entrada foram a velocidade média das embarcações para caso de emergência estimado em 15 nós e o tempo limite para atendimento como sendo de 1 hora, conforme acordado com o Órgão Ambiental. A velocidade estimada de 15 nós foi determinada como sendo a velocidade máxima média das embarcações. Entretanto, essa velocidade nem sempre é possível na prática por condições de mar adversas, desgaste natural

dos motores, peso das embarcações etc. Por isso, analisaremos no final a sensibilidade do resultado encontrado com variações desse parâmetro.

Com relação à quantidade máxima de equipamentos que poderiam ser alocados por instalação, para determinar essa capacidade de armazenamento de cada local, foi feita uma aproximação dos tamanhos dos equipamentos de forma que todos ocupam 1 módulo (volumes em  $m^3$ ) e a capacidade viável de armazenamento nos containers / armazéns seria de 12 módulos. Esse valor foi obtido de forma aproximada com base nas limitações de espaço das colônias de pescadores que sediam os equipamentos.

Também foi considerado que todas as localidades são capazes de armazenar embarcações de qualquer tipo. Isso também é uma aproximação visto que por razões diversas (de calado, tráfego marítimo, instalações físicas, etc) algumas locações eram mais favoráveis que outras para esse armazenamento.

Com essas informações de entrada foi realizada a implementação do modelo para o caso do projeto de perfurações de petróleo na Bacia de Camamu-Almada no Bloco BM-CAL-4 para determinação da alocação ótima dos equipamentos nas instalações de apoio e a conseqüente escolha das instalações de apoio necessárias para essa alocação utilizando o software Lindo API que rodou todas as instâncias experimentadas em tempo inferior a 5 segundos.

#### **4.5. Resultados**

O problema modelado para esse caso possui 3107 variáveis e 783 restrições. Foi obtida uma solução viável pelo método de *branch and bound* com um tempo de execução de 2,7 segundos, na qual todas as demandas dos cenários de inverno e verão foram atendidas em menos de uma hora. As instalações selecionadas para armazenamento dos equipamentos foram as correspondentes às instalações 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 ( $Y_1 = 0, Y_2 = 0, Y_3 = 0, Y_4 = 0, Y_5 = 0, Y_6 = 1, Y_7 = 1, Y_8 = 1, Y_9 = 1, Y_{10} = 1, Y_{11} = 1, Y_{12} = 1$  e  $Y_{13} = 0$ ) conforme ilustrado na Figura 4.8. As instalações indicadas no mapa

em vermelho foram as selecionadas pelo modelo. Os quadrados brancos indicam as áreas sensíveis e o quadrado vermelho indica a localização da plataforma ou ponto de risco.

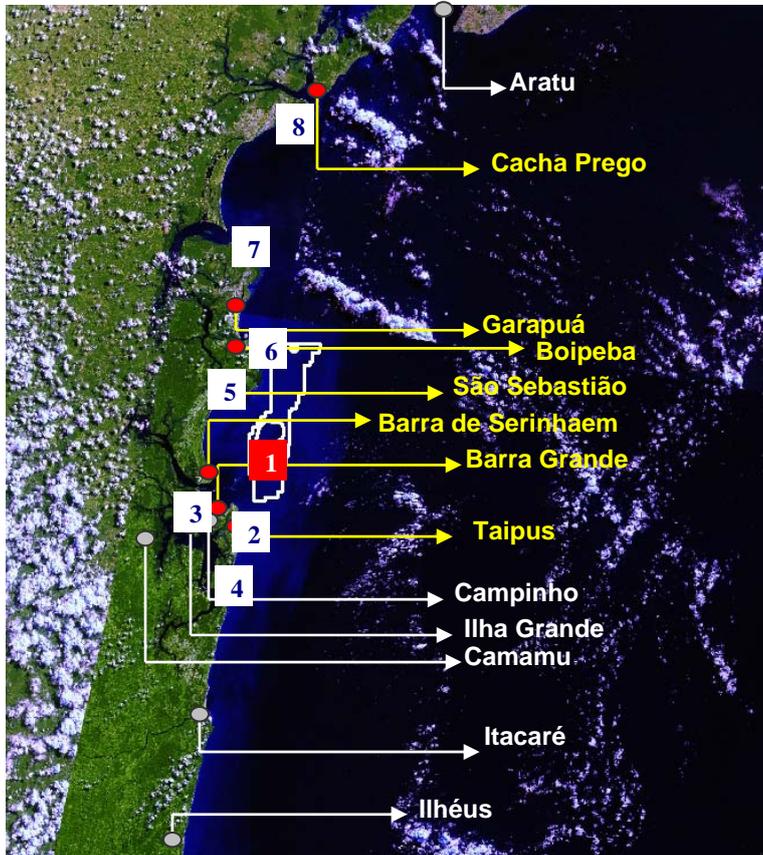


Figura 4.8 - Instalações selecionadas pelo modelo e pontos de risco

O modelo então determina o tempo de deslocamento de cada instalação até cada Ponto de Risco / Área Sensível. Pois essa informação é crucial para determinar quais equipamentos poderão ser armazenados em quais instalações considerando as demandas das áreas sensíveis e ponto de risco.

Os tempos calculados para essa instância do problema encontram-se resumidos na Tabela 4.5 que relaciona cada uma das instalações aos Pontos de Risco / Áreas Sensíveis.

	Plataforma	AS 1	AS 2	AS 3	AS 4	AS 5	AS 6	AS 7
<b>Ilhéus</b>	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

	Plataforma	AS 1	AS 2	AS 3	AS 4	AS 5	AS 6	AS 7
	atende							
<b>Itacaré</b>	Não atende	0,917	0,979	0,846	0,834	Não atende	Não atende	Não atende
<b>Camamu</b>	0,696	0,405	0,359	0,378	0,276	0,714	Não atende	Não atende
<b>Ilha Grande</b>	0,539	0,232	0,229	0,195	0,102	0,625	Não atende	Não atende
<b>Campinho</b>	0,464	0,154	0,181	0,115	0,036	0,581	Não atende	Não atende
<b>Taipus</b>	0,438	0,145	0,243	0,072	0,131	0,620	Não atende	Não atende
<b>Barra Grande</b>	<b>0,385</b>	0,081	0,115	0,081	0,051	0,507	Não atende	Não atende
<b>Barra de Serinhaem</b>	0,292	0,131	0,051	0,195	0,185	0,362	0,945	Não atende
<b>São Sebastião</b>	0,261	0,472	0,424	0,545	0,562	0,109	0,581	Não atende
<b>Boipeba</b>	0,373	0,580	0,519	0,652	0,661	0,131	0,471	Não atende
<b>Guarapuá</b>	0,573	0,797	0,733	0,870	0,876	0,334	0,254	0,861
<b>Cacha Prego</b>	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	0,697	0,072
<b>Aratu</b>	Não atende	0,645						

**Tabela 4.5 – Tempo (h) de deslocamento das instalações aos Pontos de Risco / Áreas Sensíveis**

A quantidade de equipamentos armazenados por tipo em cada uma destas instalações,  $X_{ij}$ , é mostrada na tabela 4.6. Estas quantidades irão atender às demandas de todos os cenários considerados.

O resultado obtido pelo modelo para o armazenamento dos Equipamentos nas Instalações encontra-se resumido na Tabela 4.6.

<b>Instalação</b>	<b>Inventário Proposto pelo Modelo</b>
Cacha Pregó	4 carretéis de barreira ro-boom, 1 skimmer terminator, 1 tanque inflável, 2 barcos de proteção de costa, 1 quadriciclo, 1 kit de limpeza de praia e 1 equipamento de limpeza baixa pressão.
Guarapuá	1 barreira do tipo current buster, 1 lancha rápida, 4 botes de alumínio e 6 barcos de combate.
Boipeba	1 skimmer terminator, 6 barcos de proteção de costa e 5 barcos de combate.
São Sebastião	3 carretéis de barreiras absorventes e 4 barcos de combate.
Barra de Serinhaem	1 carretél de barreira absorvente, 1 barreira do tipo current-buster, 4 barcos de proteção de costa e 6 barcos de combate.
Barra Grande	4 carretéis de barreira ro-boom, 2 barcos de proteção de costa, 1 bote inflável e 5 barcos de combate.
Taipus	4 carretéis de barreira ro-boom, 1 carretél de barreira absorvente, 1 skimmer terminator, 1 tanque inflável, 1 barco de combate, 2 quadriciclos, 1 kit de limpeza de praia e 1 equipamento de limpeza baixa pressão.

**Tabela 4.6 - Resultados obtidos pela metodologia Branch and Bound**

O valor da função objetivo para esta solução encontrada é de R\$ 30.273,78 / mês. Uma redução de 48% se comparada com o custo com as instalações atuais (adotando todas as aproximações do modelo) que era de R\$ 57.720,00 / mês. Naturalmente, o modelo, pelas diversas simplificações adotadas, não pode ser simplesmente implementado de acordo com a solução apresentada, embora sirva como uma referência para um estudo mais aprofundado na verificação da necessidade, do ponto de vista estritamente técnico de resposta a derramamentos de óleo, de todas as instalações de apoio atualmente utilizadas.

### Alocação dos equipamentos para os sites dos acidentes

O modelo define também a variável  $z_{ijks}$ , que corresponde ao número de equipamentos do tipo  $j$  a serem despachados a partir da instalação  $i$  para o ponto de risco (plataforma ou área sensível)  $k$  para um cenário do tipo  $s$ . Tais variáveis só poderão assumir valores não nulos no caso de se referirem às instalações selecionadas para armazenamento dos equipamentos.

A tabela 4.7 resume a alocação ótima do modelo das instalações para os pontos de risco (plataforma e áreas sensíveis) para os cenários de inverno (1) e verão (2). As áreas sensíveis (linhas) hachuradas não são atingidas no cenário em questão e as instalações marcadas em cinza significam que a mesma não chega à área sensível dentro do tempo crítico.

### **Alocação dos equipamentos nos Pontos de Risco por instalação – Cenário 1**

	Cacha Prego	Guarapuá	Boipeba	São Sebastião	Barra de Serinhaem	Barra Grande	Taipus
Plataforma		X					
AS 1			X	X		X	
AS 2			X		X		
AS 3		X		X		X	X
AS 4		X			X	X	
AS 5							
AS 6							
AS 7							

### **Alocação dos equipamentos nos Pontos de Risco por instalação – Cenário 2**

	Cacha Prego	Guarapuá	Boipeba	São Sebastião	Barra de Serinhaem	Barra Grande	Taipus
Plataforma						X	X
AS 1							
AS 2							
AS 3							
AS 4							
AS 5				X	X	X	
AS 6		X	X	X			

AS 7	X	X					
------	---	---	--	--	--	--	--

Figura 4.7 – Alocação dos equipamentos das instalações para os pontos de risco

#### 4.6. Análise de Sensibilidade

Analisamos a seguir a sensibilidade da solução encontrada para os parâmetros de velocidade dos barcos e de tempo máximo permitido. Para isso, testamos as seguintes hipóteses:

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Velocidade (nós)	14	16	15	15	15
Tempo Máximo (h)	1	1	1	0,8	1,2

Tabela 4.7 – Casos estudados na análise de sensibilidade

Conforme observamos na Tabela 4.7, o denominado Caso 3, corresponde ao exemplo original. Os casos 1 e 2 mantêm o valor do tempo máximo para chegada dos equipamentos aos pontos de risco (e áreas sensíveis) e varia a velocidade de deslocamento dos barcos para testar a sensibilidade deste fator na resposta. Já os casos 4 e 5 mantêm a velocidade de deslocamento dos barcos fixa e varia o tempo máximo permitido para chegada dos equipamentos. Além desses, foi investigado ainda uma opção conservadora para estimativa da velocidade das embarcações (considerando condições de mar adversas) de 10 nós para o tempo crítico de 1 hora (Caso Extra).

Os resultados obtidos para cada um desses casos está resumido na Tabela 4.8 a seguir que apresenta, para cada um deles o valor da função objetivo obtido e as instalações que foram escolhidas pelo modelo para atendimento aos pontos de risco e as áreas sensíveis.

	Função Objetivo R\$	Instalações												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Caso	30,4 k						X	X	X	X	X	X	X	

	Função Objetivo R\$	Instalações												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1														
Caso 2	27,3 k						X	X	X	X	X	X		
Caso 3	30,3 k						X	X	X	X	X	X	X	
Caso 4	Inviável				X		X	X	X	X	X	X	X	X
Caso 5	27,5 k						X	X	X	X	X	X		
Caso Extra	47,9 k				X		X	X	X	X	X		X	X

**Tabela 4.8 – Resultado da análise de sensibilidade**

Podemos observar que ao se flexibilizar um pouco o tempo máximo permitido para atendimento de 1 hora para 1,2 hora (ou 1 hora e 12 minutos) o modelo consegue atender a todas as demandas estipuladas sem utilizar a instalação número 12, o que representa uma redução na função objetivo, ou seja, no custo total desta solução em 9,2%. De forma similar, se considerada uma velocidade maior para os barcos, o modelo também obtém como resultado a não utilização da instalação 12 reduzindo o custo em 9,7%. Em posse desses dados, pode-se considerar de forma quantitativa a decisão de comprar ou não barcos mais rápidos considerando a redução no custo mensal do projeto e a expectativa de tempo de vida do mesmo.

Analisando o caso 1, onde considerou-se barcos mais lentos, observamos que isso não alterou quais instalações seriam escolhidas para atendimento ao problema mas prejudicou a função objetivo somente em 0,5% devido ao maior tempo de navegação dos barcos e conseqüente aumento do consumo de Diesel Marítimo. Note que não foram alterados nenhum outro dado de entrada inclusive o consumo médio das embarcações que poderia ser reduzido se considerado que a mesma embarcação está navegando em velocidade menor.

O último caso estudado, considerou-se que o tempo máximo para atendimento seria de 0,8 horas, ou 48 minutos. Nesse caso, o problema não

encontrou solução viável mas escolheu as instalações 4 e 13 além das já escolhidas no problema original para minimizar sua inviabilidade.

Analisando o Caso Extra, observamos que o modelo decide por abrir a instalação 13 (alto custo) para atingir as áreas sensíveis ao norte (principalmente a AS 7).

Essa análise de sensibilidade destes dois parâmetros é interessante pois pode auxiliar a decisão do empreendedor em investir em barcos de diferentes velocidades (casos 1 e 2) ou em sua negociação com o órgão ambiental durante a fase de licenciamento sobre o tempo máximo em que atenderia aos pontos de risco e áreas sensíveis (casos 4 e 5). Compreendendo o impacto prático de alguns minutos no tempo de resposta, seja na questão de custos seja na questão de viabilidade pode ser muito útil durante o processo.

## 5 – CONCLUSÕES

O modelo de otimização estratégica para alocação dos recursos de resposta para derramamentos de óleo proposto por Iakovou e adaptado para esse estudo de caso funcionou de forma satisfatória tendo como resposta uma solução ótima de alocação dos recursos.

Essa solução propiciou uma razoável redução nos custos de armazenamento dos equipamentos com a redução das instalações necessárias e o atendimento ao requisito de mobilização em 1 hora. Todas as restrições do modelo, inclusive a modificada e a adicionada, estão ativas na solução ótima encontrada.

Naturalmente, para a aplicação do modelo várias simplificações foram necessárias que precisam ser consideradas antes de sua implementação prática. Entretanto, o resultado obtido pode ser usado como um bom ponto de partida para uma reavaliação das reais necessidades de instalações de apoio e dos custos envolvidos mantendo a mesma capacidade de resposta.

Sabe-se que o problema de contingência a derramamento de óleo é apenas parte dos programas para redução dos impactos ambientais da atividade. Por isso, a decisão de escolher o local e a quantidade de instalações de apoio nem sempre é objetiva devendo levar em conta a relação com as comunidades costeiras, principalmente a pesqueira. Deve-se considerar também a questão do risco real e do risco percebido. Por mais que as modelagens indiquem que não existe a possibilidade do óleo derramado atingir parte da costa, ou que essa probabilidade seja desprezível, as comunidades se sentem mais protegidas e seguras se tiverem recursos para uma eventual resposta.

Mas podemos dizer que modelos desse tipo poderiam ser mais amplamente utilizados para auxiliar na determinação da alocação dos recursos de resposta a emergência. Naturalmente, como uma ferramenta de apoio a decisão que deverá ser refinada com fatores qualitativos (como a relação com as comunidades afetadas) e até mesmo técnicos (preferência por portos ou locais para alocação de barcos, etc.). Esses modelos devem também ser

refinados através de maior aplicação a casos reais para aperfeiçoá-los até que atinjam estágio satisfatório de confiabilidade.

Como propostas para continuação desse trabalho, podemos citar aplicação deste ou de outro modelos análogos para casos reais para que, através disso, o modelo possa ser refinado e adaptado. Principalmente para casos onde a chegada dos recursos de resposta possa se dar de acordo com o escalonamento previsto na CONAMA 293. Outra aplicação interessante seria sua aplicação para uma área geográfica definida.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIDI AS. (1993), "Locating Oil-Spill Response Centers Using Mathematical-Models", *Marine Pollution Bulletin* 26: (4) 216-219.
- ANDRADE, F.P, BOECKH, C., (2003) "Operacionalização do Plano de Emergência Individual (PEI\_CONAMA\_293): Terminais Portuários e Indústria OffShore",
- BELARDO, S., HARRAID, I., WALLACE, W. A. E WARD, J. (1984), "A partial covering approach to siting response resources for major maritime oil-spills". *Management Science*, Vol.30, No10, pp. 1184-1196.
- CEDER A. , THARAKAN G, E PSARAFTIS H, (2001), "A Synthesis algorithm for oil spill problem of complementary locations on networks" , *Applied Mathematical Modelling* 25 , 269 – 285.
- CHARNES A, COOPER W. W., HARRALD J, KARWAN, K R E WALLACE W.A. (1976), "A Goal Interval Programming Model for Resource Allocation in a Marine Environmental Protection Program ", *Journal of Economics and Management* 3, 347-362.
- CHARNES, A., COOPER, W. W., KARWAN, K. R. E WALLACE, W. A. (1979), "A chance-constrained goal programming model to evaluate response resources for marine pollution disasters", *Journal of Economics and Management*, Vol. 6, pp. 244-274.
- CHURCH, R. E REVELLE C. (1974), "Maximal covering location problem". *Papers Reg. Sci. Appl.*, Vol. 32, pp. 101-118.
- CEDER A. , THARAKAN G, E PSARAFTIS H, (2001), "A Synthesis algorithm for oil spill problem of complementary locations on networks" , *Applied Mathematical Modelling* 25 , 269 – 285.
- COSTA, L.R.T.A., (2007) "Modelo de Otimização Estratégica para Resposta a Derramamento de Óleo que Considera Áreas Sensíveis", D.Sc. UFRJ.
- COSTA, L.R.T.A, FERREIRA F., V.J.M, PINHEIRO, F. N., ANTOUN, A. R. , "Strategic Optimization and Contingency Planning Model for Oil Spill Response". IX - LACPEC (2005).
- COSTA, L.R,T.A, e FERREIRA F. , V. J. M., (2003) "Modelos com Abordagem de Cobertura para Respostas a Derramamentos de Óleo no Mar" , 2o Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás.
- COSTA, L.R,T.A, e FERREIRA F. , V. J. M., (2003) "Modelos Estratégicos de Otimização para Resposta a Derramamentos de Óleo", 4o Seminário sobre Meio Ambiente Marinho.
- EL PASO ÓLEO E GÁS DO BRASIL LTDA, Relatório de Controle Ambiental – Atividade de Perfuração Marítima do Bloco BM-CAL-4, Bacia de Camamu-Almada (2005)
- HUET, G. (2002), "Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo"
- HUET, G. (2003) "Novos Instrumentos Legais Voltados à Prevenção, Controle e Fiscalização da Poluição das Águas", site: [http://www.dpc.mar.mil.br/InformativoMaritimo/abr\\_jun03/ComMaritima/poluicao.htm](http://www.dpc.mar.mil.br/InformativoMaritimo/abr_jun03/ComMaritima/poluicao.htm)

- IAKOVOU, E., CHI M. IP, DOULIGERIS, C. E KORDE, A. (1996) - "Optimal location and capacity of emergency cleanup equipment for oil spill response", *European Journal of Operational Research*, 96, 72-80.
- IAKOVOU, E. E DOULIGERIS, C. (1996), "Strategic Transportation Model for Oil in US Waters", *Computers ind. Engng Vol 31, No 1/2*, pp. 59-62.
- IAKOVOU, E., DOULIGERIS, C. E KORDE, A. (1994), "A Synthesis of Decision Models for Analysis, Assessment, and Contingency Planning for Oil Spill Incidents", *Omega Int. 3. Mgmt. Sci., Vol. 22 (5)*, pp. 457-470.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (2005), "Manual on Oil Pollution", International Maritime Organization
- INTERNATIONAL TANKERS OWNERS POLLUTION FEDERATION, <http://www.itopf.com>, visitado dia 08 de Agosto de 2007 as 15:00 h
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2007), <http://www.mme.gov.br>, visitado dia 2 de Agosto de 2007 as 11:00 h
- MOURA, Pedro de e CARNEIRO, Felisberto, *Em Busca do Petróleo Brasileiro*. Editora Brasiliense, 1976.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES, (2003) "Oil in the Sea III: Inputs, Fates and Impacts",
- PSARFATIS, H. N., THARAKAN, G. G. E CEDER, A. (1986), "Optimal response to oil-spills: the Strategic decision case". *Operations Research Vol. 34*, pp. 203-217.
- PSARAFTIS H. E ZIOGAS B., (1985) , "A Tactical Decision Algorithm for Optimal Dispatching of Oil Spill Cleanup Equipment" , *Mannagement Science*, Vol 31, No 12, December 1985.
- RESOLUÇÃO CONAMA No 293, DE 12 de DEZEMBRO DE 2001.
- SOUZA JUNIOR, A. B. E OUTROS(2004), "Regulamentações sobre Planejamento para Resposta a Incidentes de Poluição por Óleo no Brasil", *Rio Oil & Gás (2004)*
- SRINIVASA, A. V. E WILHELM, W.E. (1996), "Strategic, Área-wide Contingency Planning Model for Oil Spill Cleanup Operations with Application Demonstrated to Galveston Bay Area", Department of Industrial Engineering – Texas A&M University – College Station, Texas 77843-3131 .
- SRINIVASA, A. V. E WILHELM, W.E. (1997), "A procedure for optimizing tactical response in oil spill clean up operations.", *European Journal of Operational Research*, 102, 554-574.