



HEURÍSTICA PARA O MODELO DE OTIMIZAÇÃO ESTRATÉGICO PARA RESPOSTA A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO.

Luiz Rodolfo Tinoco Aboim Costa¹, Virgílio José Martins Ferreira Filho²

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Neste artigo é descrito um modelo de otimização estratégico para resposta a derramamento de óleo que define um plano de custo total mínimo, que determinará os tipos e as quantidades adequadas dos equipamentos que deverão ser adquiridos para armazenamento em suas respectivas localizações adequadas, e a partir das quais poderão ser alocados de forma escalonada no tempo aos diversos pontos de risco nos cenários de derramamento identificados. Este modelo considera, além dos sistemas de contenção e recuperação de óleo que deverão ser alocados ao local do acidente, os sistemas de proteção que deverão ser destinados as áreas sensíveis vulneráveis relacionadas aos cenários identificados.

São apresentadas também duas propostas de soluções para este modelo, baseadas em métodos heurísticos, que possibilitarão a obtenção de soluções de boa qualidade em tempo computacional razoável, soluções estas que possibilitarão a utilização deste modelo em problemas que retratem situações reais.

Este modelo poderá ser utilizado para auxiliar na preparação/atualização de planos de contingência, definindo se a empresa potencialmente poluidora e/ou a empresa de serviços de resposta precisarão expandir as suas estruturas de resposta dentro de uma configuração de mínimo custo total que atende aos requerimentos da legislação.

Abstract

In this paper is described a strategic optimization model for oil spill response that defines a minimal total cost plan, that will determine the adequate quantity and types of equipment that should be acquired for storage in your respective appropriate locations, and starting from the ones which can be allocated in time phased way to several risk points of identified spill scenarios.

It is also presented two proposed solutions for this model, which are based on heuristic methods, that they will make possible obtain solutions of good quality in reasonable computational time, and that will make possible the use of this model in problems that portray real situations.

This model can be used to aid in the preparation / updating of contingency plans, defining if the company potentially pollutant and/or response company will need expand their response structures inside of a configuration of minimum total cost, fulfilling the legislation requirements.

1. Introdução

Mesmo investindo-se em prevenção e procurando-se minimizar a probabilidade de ocorrência de acidentes de derramamento de óleo, eles sempre continuarão a ocorrer, demandando um trabalho de resposta complexo e caro. Por este motivo é importante investir em planos de contingência eficientes que incluam um treinamento permanente da equipe envolvida, devendo ainda estes planos serem constantemente aperfeiçoados. Certamente o custo de investimento em um plano de contingência eficiente deverá ser muito inferior que os custos advindos dos danos causados por acidentes mau gerenciados.

A maior conscientização com relação às questões ambientais e a ocorrência de acidentes de derramamento de óleo de grande magnitude, que mesmo com medidas preventivas não podem ser totalmente evitados, exige a criação e o aperfeiçoamento de legislações adequadas em todo o mundo. Tais legislações passam a exigir que as partes envolvidas implementem planos de contingência adequados. Estes então passam a ser criados e aperfeiçoados para permitir um maior controle sobre as situações de emergência geradas por tais acidentes.

¹ Doutorando Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ.

² D.Sc. Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ.

A estrutura deste artigo é dada a seguir: Na seção 2 são abordados aspectos relacionados a derramamento de óleo e citados os principais modelos de otimização estratégicos relacionados, na seção 3 é descrito o modelo proposto neste trabalho. Na seção 4 são citadas duas soluções heurísticas que estão sendo desenvolvidas com o intuito de chegar a uma solução para o modelo que ao mesmo tempo seja de boa qualidade e utilize um tempo computacional reduzido. Finalmente na seção 5 é apresentada a conclusão do trabalho.

2. Derramamento de óleo e os modelos estratégicos utilizados para auxiliar a tomada de decisão.

Derramamentos de óleo ocorrem com frequência em todas as partes do mundo ocasionando impactos de natureza ambiental, social e econômica. Devido a este fato, foram sendo desenvolvidos ao longo do tempo, no mundo e mais recentemente no Brasil, regulamentações ambientais adequadas com o intuito de incentivar o desenvolvimento de medidas preventivas e de controle com relação aos derramamentos de óleo. Uma característica dessas regulamentações é a exigência de que companhias de exploração, produção e transporte de óleo possuam planos abrangentes de resposta à possíveis eventos de derramamento de óleo, estando incluído nestes os planos de emergência individuais, planos de emergência de área e o plano de contingência no âmbito nacional. Estes planos deverão atuar como importantes instrumentos para auxiliar o gerenciamento dos acidentes de derramamento de óleo, ajudando a minimizar os impactos que podem ser gerados.

No Brasil é a Lei 9.966 de 2000 que trata das questões relacionadas à poluição por óleo. A Resolução CONAMA nº 293/01 veio regulamentar o Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo, estabelecendo o seu conteúdo mínimo, passando a constituir um requisito relevante para licenciamento ambiental. O Decreto nº 4871 de Novembro de 2003 regulamentou o Plano de Área e o Plano de Contingência Nacional está em fase de regulamentação.

Na preparação de um plano de contingência efetivo relacionado a derramamentos de óleo devem ser considerados numerosos fatores e diversas alternativas, podendo neste caso, os modelos de otimização auxiliarem na tomada de decisão, Srinivasa e Wilhelm (1996).

O problema de derramamento de óleo é na realidade complexo devendo ser estruturado nos níveis estratégico, tático e operacional. Parfatis, Tharakan e Ceder (1986), Iakovou e outros (1996), Srinivasa e Wilhelm (1996).

Para o problema de derramamento de óleo 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 quantidades de equipamentos necessários e os locais mais adequados para armazená-los. Um dos requisitos que direcionará o posicionamento destes equipamentos é o atendimento do tempo máximo de resposta. 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 nível operacional está relacionado com o uso dos equipamentos uma vez que estes tenham chegado à cena do acidente. Existe uma forte conexão entre estes níveis de decisão. As decisões estratégicas impõem restrições severas nas decisões a serem tomadas quando os derramamentos efetivamente ocorrerem.

Poucos estudos trataram de modelos com enfoque de otimização relacionados à resposta a derramamentos de óleo, tanto sob o ponto de vista estratégico quanto tático e operacional, Parfatis, Tharakan e Ceder (1986), Srinivasa e Wilhelm (1996). Serão citados a seguir os principais modelos estratégicos com enfoque de otimização relacionados à resposta a derramamentos de óleo.

Belardo, Harrauld and Wallace (1984) desenvolveram um modelo utilizando uma extensão da abordagem de Máxima Cobertura para definir os recursos de resposta necessários para grandes derramamentos de óleo que ocorrem perto da costa, em corpos d'água semi-fechados, onde existe um risco significativo de derramamento, os quais são vistos como eventos de emergência.

Psaraftis, Tharakan e Ceder (1985) desenvolveram um modelo estratégico de resposta à derramamento de óleo, que permite definir onde localizar diversos tipos e quantidades de equipamentos de resposta capazes de responder a futuros derramamentos de óleo. A localização destes equipamentos leva em consideração eventos com elevado potencial de derramamento de óleo. Foi formulado um modelo de programação linear mista inteira com o objetivo de minimizar a soma esperada dos custos do sistema de resposta e dos custos dos danos causados pelos derramamentos. Num aperfeiçoamento da solução deste modelo estratégico, Ceder, Tharakan e Psaraftis (2000) propõem um algoritmo heurístico de síntese em redes.

Iakovou, Douligeris e Korde (1996) propuseram um modelo estratégico que possui uma estrutura integrada na qual as decisões considerando a localização ótima, número e tipo dos equipamentos a serem armazenados, são feitas baseadas em decisões considerando a alocação ótima do equipamento para responder aos derramamentos de óleo.

Srinivasa e Wilhelm (1996) 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 a 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 impostos pelas leis mais recentes.

Srinivasa e Wilheam (1996) visualizaram uma utilização integrada do modelo por eles proposto, auxiliando na preparação de um plano de contingência de área, que tem como uma de suas funções coordenar a utilização de todos os equipamentos de respostas disponíveis entre as partes envolvidas. Este modelo auxiliará a tomada de decisão das várias organizações envolvidas, auxiliando-as a preparar planos de contingência que levam em consideração todas as localizações de armazenamento de equipamentos que foram estrategicamente definidas e/ou estão sendo definidas, integrando de forma consistente todo o conjunto de planos para todas as organizações dentro da área considerada.

Colocam os autores que o modelo de resposta a derramamento de óleo deverá ser utilizado sempre que houver necessidade de se adquirir novos equipamentos ou sempre que qualquer parte responsável estiver preparando um plano de contingência. Exemplificam como o modelo poderia então ser utilizado pelas organizações envolvidas com o derramamento de óleo: a) Uma empresa individual deveria aplicar o modelo trimestralmente a medida que for atualizar o seu plano de contingência. O modelo permitirá avaliar a utilização dos equipamentos a partir das variadas fontes, definindo também quais deverão ser comprados e aonde estes deverão ser armazenados de modo a cumprir as suas obrigações quanto à resposta. b) Empresas de navegação que transportam óleo poderiam usar o modelo considerando somente os pontos de risco para os quais elas teriam responsabilidade, planejando então um plano de contingência que utilize os equipamentos de resposta transportados em seus navios, os fornecidos pelas facilidades de armazenamento localizadas em terra e os fornecidos por empresas de serviços de resposta contratadas no caso da ocorrência de derramamentos de um maior porte. c) As empresas de serviços de resposta contratadas podem usar o modelo considerando os pontos de risco relacionados às partes responsáveis nas quais foram estabelecidos contratos. O modelo então indicará quais novos equipamentos ela deverá possuir e em quais facilidades estes equipamentos deverão estar armazenados. Isto ajudará elas a se planejarem melhor, tornando-se mais competitivas. d) Órgãos do governo poderiam usar o modelo para avaliar a capacidade estratégica de resposta da área, ou seja, a capacidade combinada das partes responsáveis e das empresas de serviço de resposta contratadas, indicando assim quais equipamentos adicionais deveriam ser comprados e aonde eles deveriam ser armazenados.

Dentre os modelos citados anteriormente, o Modelo de Srinivasa e Wilheam (1996) foi o único que fez uma aplicação a uma situação real e o único que considerou os requerimentos mais recentes da legislação. Ele é o principal trabalho que serviu de base para o modelo proposto neste artigo, que será descrito na seção a seguir. O modelo a ser apresentado considera, além dos sistemas de contenção e recuperação de óleo que deverão ser alocados ao local do acidente, os sistemas de proteção que deverão ser destinados às áreas sensíveis vulneráveis que serão potencialmente atingidas nos cenários identificados.

Áreas sensíveis que poderão ser atingidas por um derramamento de óleo em um dado cenário, deverão ser identificadas para serem então estudadas as medidas de proteção adequadas. A modelagem do derramamento de óleo, através dos modelos de transporte e dispersão de óleo, identificará a área de influência indireta das atividades que poderão causar derramamentos de óleo.

3. Modelo Proposto de Otimização Estratégico para Resposta a Derramamento de Óleo que considera a alocação de Sistemas de Proteção às Áreas Sensíveis.

Será descrito a seguir o modelo proposto deste trabalho, que foi anteriormente apresentado em Costa, L.R. e outros (2005), onde foi feita uma aplicação para um caso exemplo e obteve-se uma solução utilizando a técnica de relaxação de programação linear, a qual não garante que seja encontrada uma solução próxima do valor ótimo e nem mesmo, garante uma solução viável. Neste artigo serão descritos na próxima seção os dois métodos heurísticos que estão sendo desenvolvidos especificamente para este modelo proposto com o intuito de se obter uma solução de boa qualidade em um tempo computacional considerado aceitável.

Inicialmente são definidas as notações que serão utilizadas neste modelo sendo em seguida apresentado a sua função objetivo e as suas restrições.

CONJUNTOS

F Conjunto das localizações das facilidades 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 sites dos acidentes (pontos de risco).

C(r) Conjunto dos cenários de derramamento 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/recuperação 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} .

$L1(sicr)$ Conjunto das localizações das facilidades 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} .

$L2(s'picr)$ Conjunto das localizações das facilidades 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 facilidades $f \in F$ r sites 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 $s \in S$ ($s' \in S'$) s' tipos de sistemas de resposta $s' \in S'$
 $f1$ facilidades associadas ao conjunto $L1(sicr)$ $f2$ facilidades associadas ao conjunto $L2(s'picr)$

VARIÁVEIS DE DECISÃO

t_f nova capacidade a ser adicionada na facilidade $f \in F$.

y_f será 1 se for estabelecida uma facilidade nova na localidade f ou expandida a capacidade de uma facilidade f já existente, caso contrário será 0.

x_{fs} número de sistemas do tipo $s \in S$, a ser comprado e armazenado na facilidade f .

$a_{fs'}$ número de sistemas do tipo $s' \in S'$, a ser comprado e armazenado na facilidade f .

z_{fsicr} número de sistemas do tipo $s \in S(icr)$ a serem despachados da facilidade $f \in L1(sicr)$, 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} , onde $t_{ocr}=0$ e $i \in I(cr)$.

$n_{fs'picr}$ número de sistemas do tipo $s' \in S'(picr)$ a serem despachados da facilidade $f \in L2(s'picr)$ 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} , onde $t_{ocr}=0$ e $i \in I(cr)$.

PARÂMETROS

M_f tamanho(capacidade) máxima, em m^3 , da facilidade 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 .

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

ls' 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_{icr} ($n < i$).

Obs: Será considerado no modelo $W_s = 20\% \times \text{Capacidade de Recolhimento Nominal}$, como definido no PEI.

t_{tf} 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} , 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 facilidade f , em m^3 . $B_f = t_{tf} - \sum_s ds D_{fs} - \sum_{s'} ls' U_{fs'}$

H horizonte de planejamento (1 a 3 anos).

X_{cr} taxa média na qual derramamentos num cenário c ocorrem no ponto de risco r (núm. de derram. por ano).

PARÂMETROS DE CUSTO

F_f Custo fixo para abrir uma facilidade nova/ expandir uma existente na localização f .

V_f Custo variável (por m^3) para estabelecer/expandir a capacidade da facilidade 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 $f \in L1(sicr)$, 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 $f \in L1(sicr)$, 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'ε S'(picr), inicialmente armazenados em fε L2(s'picr), atuando na área sensível p, associada ao cenário c, no ponto de risco r, a partir do instante ticr.

CTO'fs'picr = Xcr H CO'fs'picr, Valor Presente do custo total esperado de compor e operar sistemas do tipo s'ε S'(ipcr), inicialmente armazenados em fε L2(s'picr), atuando na área sensível p, associada ao cenário c, do ponto de risco r, no instante ticr, considerando um horizonte de planejamento de H anos.

Modelo Proposto

$$\min \sum_f F_f y_f + \sum_f V_f t_f + \sum_f \sum_s G_{fs} x_{fs} + \sum_f \sum_s E_{fs} a_{fs'} + \quad (1)$$

$$\sum_{f \in L_1(sicr)} \sum_s \sum_i \sum_c \sum_r CTO_{fsicr} z_{fsicr} + \sum_{f \in L_2(s'picr)} \sum_{s'} \sum_p \sum_i \sum_c \sum_r CTO'_{fs'picr} n_{fs'picr}$$

Sujeito a

$$t_f \leq y_f M_f \quad \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_s d_s x_{fs} + \sum_{s'} l_{s'} a_{fs'} \leq t_f + B_f \quad \forall f \in F, s \in S, s' \in S' \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^i z_{fsicr} \leq x_{fs} + D_{fs} \quad (4)$$

$$\forall f \in L_1(sicr), r \in R, c \in C(r), i \in I(cr), s \in S(icr)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_p n_{fs'picr} \leq a_{fs'} + U_{fs'} \quad (5)$$

$$\forall f \in L_2(s'picr), \forall r \in R, c \in C(r), i \in I(cr), s' \in S'(picr), p \in P(cr)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_f \sum_s z_{fsicr} \cdot W_{sincr} \geq K_{icr} \quad (6)$$

$$\forall f \in L_1(sicr), r \in R, c \in C(r), i \in I(cr), s \in S(icr)$$

$$\sum_{n=1}^i \sum_f \sum_s n_{fs'picr} \cdot Q_{s'} \geq QT_{picr} \quad (7)$$

$$\forall f \in L_2(s'picr), \forall r \in R, c \in C(r), i \in I(cr), s' \in S'(picr), p \in P(cr)$$

$$y_f \in \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (8)$$

$$t_f \geq 0 \quad \forall f \in F$$

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

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

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

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

A função objetivo do modelo (1) procura minimizar o valor presente do custo total que consiste no custo de estabelecer/expandir facilidades, 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 (2) limita o tamanho de uma nova facilidade ou da expansão de uma facilidade já existente por um limite superior M_f .

Na restrição (3) o núm. de sistemas do tipo s e do tipo s' é limitado pela capacidade de armazenamento desta facil.

A restrição(4) define que o número de sistemas s ε S(icr) que devem ser despachados da facilidade f ε L1(sicr) para o ponto de risco r, em um cenário c, não deve exceder o número de sistemas s desta facilidade.

A restrição(5) define que o número de sistemas $s' \in S'(picr)$ que devem ser despachados da facilidade $f \in L2(s'picr)$ 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 facilidade.

A restrição(6) define que a quantidade de sistemas $s \in S(icr)$, dados por Z_{fsicr} , que serão despachados das facilidades $f \in L1(sicr)$, deverão atender aos requerimentos de recolhimento estipulados para cada instante crítico i , de cada cenário c , de cada ponto de risco r .

A restrição(7) define que a quantidade de sistemas $s' \in S'(picr)$, dados por $n_{fs'picr}$, que serão despachados das facilidades $f \in L2(s'picr)$, 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 .

A restrição (8) define que Y_f deverá ser binário e x_{fs} , $a_{fs'}$, Z_{fsicr} e $n_{fs'picr}$ deverão ser inteiros positivos e T_f deverá ser maior ou igual a 0.

O modelo acima descrito é do tipo programação misto inteira geral pertencendo a categoria dos problemas NP-Hard, exigindo um tempo computacional proibitivo. Na seção a seguir será abordada as técnicas de solução que estão sendo desenvolvidas para ele.

4. Solução Heurística para o Modelo

Após ser definido o modelo em questão, apresentado na seção anterior, deverá ser obtida uma solução para o mesmo. No caso deste trabalho trata-se de um modelo de natureza combinatória (modelo de programação linear misto inteira geral -MIP) que irá requerer a utilização de um número elevado de restrições e de variáveis inteiras, para o caso de problemas que retratem situações de escala real. Para estes casos o tempo de computação necessário para a resolução do problema será proibitivo quando forem utilizados métodos de solução tradicionais (algoritmos exatos), sendo que destes, o mais utilizado é o método Branch-and-Bound, que requer uma grande quantidade de tempo e de memória em muitos problemas práticos.

Não é necessário que a solução de um modelo de otimização de resposta a derramamento de óleo seja resolvida em “tempo real”, uma vez que este está relacionado a um processo de planejamento estratégico que envolve um horizonte de planejamento que poderá ser de 1 a 3 anos, como sugerido por Srinivasa e Wilheam(1996). Entretanto é importante que o tempo de computação levado na solução do referido modelo seja pequeno de modo a permitir um rápido feedback com o tomador de decisão, permitindo assim que sejam feitas análises de resultados do tipo “What If”.

Por este motivo está sendo desenvolvido, para o modelo apresentado neste trabalho, uma solução baseada em métodos heurísticos. Tais métodos permitirão a obtenção de uma solução de boa qualidade (próxima do ótimo) em um tempo de computação razoável. Os métodos heurísticos são algoritmos baseados em regras empíricas e a aplicação destas regras irá variar com o tipo de problema, de modo que um mesmo método não poderá ser usado diretamente em um outro problema. A maioria das heurísticas podem ser categorizadas como heurísticas gulosas ou como heurísticas de busca local. As heurísticas gulosas realizam n iterações estabelecendo o valor de uma variável a cada iteração. Os procedimentos de busca local partem de uma solução viável e tentam encontrar uma solução melhor realizando algum procedimento de troca na vizinhança da solução corrente. Uma outra categoria especial é denominada Metaheurística que consiste em técnicas de aplicação mais gerais, as quais administram um método heurístico em busca de uma solução próxima do ótimo. Dentre as Metaheurísticas existentes podemos citar Tabu Search, Algoritmos Genéticos, Grasp, Simulating Anneling, VNS etc...

Uma ampla faixa de problemas de otimização combinatória direcionados para problemas de programação inteira binária foram resolvidos nas três últimas décadas utilizando-se métodos heurísticos, Balas and Martin (1980) e Metaheurísticas, Glover and Laguna(1997). Em uma menor intensidade, os métodos heurísticos foram aplicados a problemas envolvendo modelos de Programação Linear Misto Inteira Geral (MIP), Balas and Schmieta and Wallace (2004), e mais recentemente também vem sendo propostas Metaheurísticas a estes problemas; Hansen, Mladenovic, and Urošević (2006), João Pedroso (2004).

Para o modelo relacionado a este artigo, apresentado na seção 3, que como foi citado é do tipo Programação Linear Misto Inteira Geral (MIP), está sendo desenvolvida uma metodologia heurística do tipo construtiva baseada na relaxação de programação linear que segue a mesma linha do trabalho de Srinivasa e Wilheam(1996). Uma outra possibilidade que está sendo avaliada é a utilização da metodologia Tabu Search direcionada a problemas de programação misto inteira geral, João Pedroso (2004).

Será feito então a seguir uma breve descrição dessas duas abordagens heurísticas.

4.1. Heurísticas do Tipo Construtiva baseada em Relaxação de Programação Linear para problemas MIP.

Neste método heurístico tem-se o objetivo de atingir soluções inteiras viáveis próximas do ótimo arredondando-se de maneira sequencial as variáveis inteiras consideradas fracionárias nos problemas de Programação Linear Relaxado intermediários.

Srinivasa e Wilheam(1996) adaptaram este tipo de heurística à estrutura do modelo estratégico e de planejamento de contingência de área proposto por eles, citado na seção 2. Eles utilizaram sete heurísticas do tipo construtiva sendo três delas baseadas em arredondamento e quatro delas baseadas em processamento de listas. Citam estes autores que estes tipos de heurísticas provaram ser eficientes em problemas de programação inteira geral, mas elas tiveram que ser adaptadas para o modelo proposto por eles considerando o conjunto específico das variáveis inteiras interrelacionadas existentes. Definiram a sequência na qual os tipos de variáveis inteiras existentes devem ser arredondadas, com base em uma análise preliminar que indicou como soluções viáveis eram mais facilmente obtidas. Esta sequência foi seguida tanto nas heurísticas de arredondamento quanto nas heurísticas de processamento de listas.

O princípio do arredondamento é adaptado pela resolução da relaxação de programação linear (PL), diferindo o momento em que esta relaxação ocorre nas três heurísticas de arredondamento citadas. Para a 1ª heurística (H1) a resolução da relaxação de PL ocorre após cada grupo de variáveis inteiras ser processado, na 2ª heurística (H2) após cada variável inteira ser individualmente processada e na 3ª heurística (H3), após um grupo de variáveis inteiras ser processado, é ativado o algoritmo de Branch Bound para encontrar uma solução exata.

Heurísticas da categoria de processamento de listas foram planejadas para arredondar as variáveis de uma maneira mais criteriosa. Estas passaram a considerar um procedimento para reduzir o custo total, pela remoção de excesso de capacidade gerada pelas soluções provenientes do arredondamento, uma vez que o arredondamento sozinho leva a soluções que embora sejam viáveis, possuem em geral elevados custos. As quatro heurísticas propostas desta categoria diferem entre si na maneira pela qual as variáveis são ordenadas: por ordem crescente da função objetivo (heurística H4), do valor da solução (heurística H5), de um dado fator de contribuição (heurística H6), do valor da solução e de um fator de contribuição (heurística H7).

Desta maneira, as heurísticas da categoria de processamento de listas combinam uma estratégia gulosa com uma estratégia de busca local.

Utilizou-se um procedimento de pré-processamento denominado Probing, antes de cada uma das heurísticas consideradas, com o objetivo de fixar as variáveis mais influentes e assim facilitar a solução. Foi usada uma lógica Probing padrão para fixar as variáveis binárias Z, as quais prescrevem se uma nova facilidade de armazenamento será aberta ou se a capacidade de uma facilidade existente será expandida.

4.2. Tabu Search aplicada a problemas de Programação Linear Misto Inteiro Geral (MIP).

Tabu Search é uma metaheurística proposta por Glover, que vem sendo aplicada com sucesso numa variedade de problemas combinatórios envolvendo variáveis inteiras binárias, Glover e Laguna (1997).

Pedroso (2004) apresentou uma versão desta metodologia para resolver problemas da categoria linear misto inteiro geral (MIP), a qual mostrou um meio de se aproximar da solução ótima para a maioria de um conjunto de problemas benchmark testados por este autor. Nesta versão o autor considerou a aplicação a problemas genéricos de MIP, sem considerar particularidades específicas dos problemas testados.

Pedroso (2004) coloca ainda que a sua implementação não é a única possível, citando que outros três procedimentos de aplicação de Tabu Search a problemas MIP foram anteriormente discutidos em Glover (1990), os quais utilizaram estratégias um tanto diferentes das propostas por ele, mas que pareciam não terem sido implementadas e testadas até aquela data. Este autor apresentou então uma estratégia básica de Tabu Search simples aplicada a MIP, baseada numa memória de curto prazo como descrita por Glover (1989), e também complementou esta com estratégias de intensificação e diversificação como descrito por Glover (1990), com o intuito de melhorar a performance do algoritmo.

A formulação de programação matemática para o problema linear misto inteiro é dada por:

$$Z = \min_{x,y} \{ cx + hy : Ax + Gy \geq b, x \in Z_+^n, y \in R_+^p \} \quad (9)$$

onde Z_+^n é o conjunto n-dimensional de inteiros e não negativos e R_+^p o conjunto p-dimensional de reais e não negativos. A e G são matrizes $m \times n$ e $m \times p$, respectivamente, aonde m é o número de restrições. As variáveis inteiras são indicadas por x, e as variáveis contínuas são indicadas por y. Restrições adicionais de limites para as variáveis inteiras são:

$$l_i \leq x_i \leq u_i, \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (10)$$

A idéia básica da estratégia proposta por Pedroso(2004) consiste em fixar as variáveis inteiras x por tabu search, e obter o valor correspondente da função objetivo Z e das variáveis contínuas y resolvendo o problema de programação linear LP associado. Assim o Tabu Search é utilizado somente para fixar as variáveis inteiras, e as variáveis contínuas poderão ser determinadas de forma não ambígua em função delas.

No processo de avaliação da solução, primeiro deve ser formulado o problema de programação Linear PL pela fixação de todas as variáveis inteiras do problema MIP com os valores determinados pelo procedimento Tabu Search:

$$Z = \min_y \{ cx + hy : Ax + Gy \geq b, x = \bar{x}, y \in R_+^p \} \quad (11)$$

Agora poderá ser resolvido o problema puramente linear usando o algoritmo Simplex.

A solução inicial é obtida pelo arredondamento das variáveis inteiras partindo dos valores ótimos da relaxação de programação linear. O procedimento Tabu Search inicia sua atuação a partir desta solução inicial, fazendo mudanças exclusivamente nas variáveis inteiras e depois as variáveis contínuas serão recalculadas através das soluções de programação linear.

As modificações das soluções serão feitas usando uma estrutura de vizinhança simples: aumentando ou diminuindo uma unidade ao valor de cada variável inteira do MIP. Esta vizinhança para solução x é um conjunto de soluções as quais diferem de x de um elemento, cujo valor é uma unidade acima ou abaixo, de x_i . Consequentemente x' será uma solução vizinha de x se $x'_i = x_i + 1$, ou $x'_i = x_i - 1$, para um índice i , e $x'_j = x_j$ para todos os índices $j \neq i$.

Movimentos serão tabu se eles envolverem a variável que tenha mudado de valor recentemente. O critério de aspiração permite que movimentos tabu sejam aceitos caso eles levem a uma solução superior a encontrada até o momento.

A partir do procedimento de Tabu Search Simples, Pedroso implementou estratégias de intensificação e diversificação. Na estratégia de intensificação é permitido que as variáveis não-tabu sejam fixadas por Branch and Bound. Na estratégia de diversificação são criadas novas soluções baseadas em relaxação de programação linear, mas mantendo parte da solução corrente inalterada. Para este último caso a qualidade da solução foi consideravelmente melhorada, além do tempo de CPU requerido para solucionar o problema ter sido significativamente reduzido.

6. Conclusão

Este artigo apresentou um modelo de otimização estratégico para resposta a derramamento de óleo baseado nos modelos mais recentes da literatura e leva em conta as preocupações ambientais que se tornam a cada dia mais rigorosas. Tal modelo considera, além dos sistemas de contenção e recuperação de óleo que deverão ser alocados ao local do acidente, os sistemas de proteção que deverão ser destinados as áreas sensíveis vulneráveis relacionadas aos cenários identificados. Foram apresentados também, de forma sucinta, dois métodos heurísticos que estão sendo adaptados para gerar soluções para este modelo proposto. Tais métodos tem o intuito de produzir soluções de boa qualidade e com reduzido tempo computacional, permitindo assim que tal modelo seja utilizado em problemas que retratem situações reais.

7. Agradecimentos

Esta pesquisa contou com o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo (ANP) para o Setor Petróleo e Gás, através do programa PRH-ANP/MCT Nº 21.

8. Referências

- BALAS E, MARTIN, C.H. Pivot and complement- a heuristic for 0-1 programming. *Manag. Science* 1980; 26:86-96.
- BALAS E, SCHMIETA, WALLACE, Pivot and Shift-a mixed integer programming heuristic. *Discr. Optm.* 2004;1:3-12.
- BELARDO, S., HARRAID, I., WALLACE, W. A. E WARD, J., "A partial covering approach to siting response resources for major maritime oil-spills". *Management Science*, Vol.30, No10, pp. 1184-1196. (1984)
- 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, FERREIRA F., V.J.M, PINHEIRO, F. N., ANTOUN, A. R. , "Strategic Optimization and Contingency Planning Model for Oil Spill Response". IX - LACPEC (2005).
- GLOVER, Fred. Tabu search-part I. *ORSA Journal on Computing*, 1:190-206, 1989.
- GLOVER, Fred. Tabu search-part II. *ORSA Journal on Computing*, 2:4-32, 1990.
- GLOVER, Fred. And LAGUNA, M. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- HANSEN, P., MLADENOVIC, N., UROSEVIC, D., Variable neighborhood search and local branching. *Computers & Operations Research* 33 (2006) 3034-3045
- 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.
- PARFATIS, 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.
- PEDROSO, J.P., Tabu Search for Mixed Integer Programming. DCC-FC & LIACC, Univ. do Porto (March 2004).
- SRINIVASA, A. V. E WILHELM, W.E. (1996), "Strategic, Area-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 (1996).