

# UM MODELO MATEMÁTICO PARA A PROGRAMAÇÃO E ROTEIRIZAÇÃO DE EMBARCAÇÕES DE APOIO À EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

**FERNANDO CORREA HENTZY (Petrobras)**

fernando\_hentzy@yahoo.com.br

**Edwin Benito Mitacc Meza (UFF)**

emitacc@gmail.com

**Dalessandro Soares Vianna (UFF)**

dalessandro@ucam-campos.br

**MARCILENE DE FATIMA DIANIN VIANNA (UFF)**

marcilenedianin@gmail.com



*O crescente aumento de investimentos nas atividades offshore de petróleo tem promovido uma verdadeira corrida contra o tempo para se desenvolver toda a cadeia produtiva do setor. Neste cenário, as atividades de apoio logístico têm desafiado aos gestores a buscarem alternativas que possam reduzir os custos operacionais e ao mesmo tempo, atender a expectativa do cliente em relação ao nível de serviço ofertado. Dentre estas atividades, a programação e construção de roteiros de uma frota de embarcações, para o transporte de suprimentos para as unidades marítimas, tem sido uma das mais importantes e ao mesmo tempo complexa devido ao aumento da frota e da demanda. Neste artigo é proposto um modelo matemático para auxiliar na programação e elaboração dos roteiros de cada embarcação da frota. Alguns resultados preliminares são apresentados, de forma a mensurar o nível de eficiência do modelo para situações que podem ser observadas na realidade.*

*Palavras-chaves: Roteirização, Programação Inteira-mista, Offshore*

## 1. Introdução

Diante das recentes descobertas de acumulações gigantescas de petróleo e gás natural na extensa camada Pré-Sal presente em boa parte da plataforma continental brasileira, a Petrobras, após mais de meio século de pesquisas e experiências acumuladas, novamente depara-se com desafios tecnológicos, gerenciais e logísticos, proporcionais à grandeza dos reservatórios localizados nessa nova fronteira tecnológica. Nesse contexto, as atividades *off-shore* têm sido fortemente intensificadas, recebendo um percentual significativo dos investimentos para que os objetivos estratégicos da companhia e do país possam ser alavancados.

Dentre estas atividades, a logística tem mostrado uma especial importância, dado o impacto financeiro e estratégico que exerce sobre as outras atividades. Do ponto de vista estratégico, a gestão eficiente dos processos logísticos pode se apresentar como vantagem competitiva, sendo a fonte desta vantagem a diferenciação da organização aos olhos dos clientes e a redução dos custos de operação.

Com a busca constante por melhorias no atendimento e aumento da eficiência (incluindo reduções de custos e de tempo de entrega), as organizações investem cada vez mais em sistemas informatizados. Nos últimos anos, os operadores logísticos atuantes no Brasil procuraram ampliar a utilização de sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning* ou Sistemas Integrados de Gestão Empresarial, no Brasil) e roteirizadores (SILVA, 2010; SIKILERO, 2009; SLACK et al., 2009)

Dentro da Petrobras, vários suprimentos são transportados até as Unidades Marítimas (UM's) por meio de embarcações para que os projetos de exploração e produção de petróleo possam ser desenvolvidos.

Assim, uma importante atividade é a determinação da roteirização e da programação de atendimento destas embarcações, de forma a atender todas as solicitações de suprimentos nos prazos pré-determinados para que as atividades a bordo das UM's possam ser realizadas de forma contínua, sem que haja interrupções que gerem atrasos nos projetos e a consequente perda econômica para a empresa.

A partir deste cenário bastante complexo no qual são consideradas inúmeras variáveis de decisão na elaboração das roteirizações e das programações das embarcações, é natural o surgimento de questionamentos sobre a eficácia do atual *modus operandi* aplicado à programação da frota existente. Principalmente, se for considerado as recentes descobertas de reservas de petróleo que apontam para um forte crescimento da demanda, o que leva a pensar em uma solução computacional para resolver o problema de programação e roteirização das embarcações.

Cabe ressaltar, que devido à existência de várias combinações possíveis dos parâmetros em um problema de programação e roteirização, nem sempre é possível encontrar na literatura um problema que se encaixe exatamente nas condições reais estudadas, para o qual já exista uma abordagem proposta com um algoritmo de solução já desenvolvido.

Assim, devido à natureza real do problema, existe a necessidade de identificar os fatores mais importantes para o desenvolvimento de um modelo formal que permita representar o problema real e obter soluções que auxiliem na tomada de decisões.

A utilização de ferramentas de Pesquisa Operacional (PO), neste problema, surge como uma alternativa viável para o tratamento da complexidade inerente ao processo logístico, pois, por meio do uso destas ferramentas, pode-se representar uma situação do mundo real, estudar seu comportamento (via execução de modelos formais) e tomar decisões com base nas conclusões extraídas.

O objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático que permita auxiliar ao operador na determinação das rotas e da programação de atendimento de cada uma das embarcações da frota, que podem estar localizadas nos portos ou cumprindo escala de atendimentos. A solução do modelo deverá fornecer como produto o roteiro de cada embarcação bem como sua programação de atendimento, de forma a minimizar as distâncias percorridas, otimizando a utilização da frota e reduzindo os riscos de paradas operacionais nas unidades marítimas por falta de suprimentos. Além disso, espera-se a redução do tempo na tomada de decisão do programador, liberando-o para outras atividades.

Na Seção 2 é feita uma descrição do problema tratado. Na Seção 3 é apresentado o modelo matemático proposto. Já na Seção 4 são mostrados os testes computacionais para validação do modelo, e por último a Seção 5 apresenta as conclusões e trabalho futuros.

## 2. Delimitação do Problema

Atualmente, na exploração e produção de petróleo em campos marítimos são desenvolvidas atividades que necessitam de equipamentos de última geração e de uma série de suprimentos, tais como: água, diesel, alimentos, tubos de perfuração e produção, cimento, granéis sólidos (baritina, bentonita e calcário) e granéis líquidos (fluidos de perfuração e completação), indispensáveis à execução dos projetos de poços marítimos.

Estes insumos são transportados até as Unidades Marítimas (UM's) através de embarcações de transporte de suprimentos com características operacionais diversas (tipo, tamanho, velocidade e capacidade de carga).

Para efeito de planejamento, a equipe de logística, recebe os pedidos enviados pelas UM's por meio eletrônico com prazo mínimo de atendimento de 48 horas. Estes pedidos são atualizados diariamente por telefone pela mesma equipe, já que eventuais mudanças no cronograma e no próprio projeto do poço de petróleo alteram não só as datas de atendimento (data mais cedo e data mais tarde), mas também as quantidades a serem atendidas.

À medida que os pedidos são atualizados, os mesmos são classificados em “a confirmar” e “confirmados” em um banco de dados que contém, entre outras, todas as informações referente a estes pedidos, para que os que possuem o *status* de “confirmado” sejam identificados e programados pela equipe de decisores.

A etapa de roteirização e programação das embarcações consiste em definir para cada embarcação o seu roteiro (escala de atendimento) com as tarefas de entrega que cada uma deverá cumprir, de acordo com os pedidos extraídos do banco de dados no subgrupo “confirmados”. Outras restrições devem ser consideradas no momento da programação, como a capacidade de transporte de cada embarcação devido à frota heterogênea. Nesta etapa, são consideradas na maioria das vezes apenas as tarefas e pedidos com prazo de atendimento em

até 72 h, pois o planejamento num horizonte superior a este tempo não agregaria valor em função das constantes mudanças no cronograma das UM's.

Ao distribuir as programações para cada embarcação (roteirização e programação), o programador busca reduzir as distâncias percorridas por esta, utilizando para isto a ferramenta computacional GIS-SUB que é um software de localização geográfica que permite identificar a posição de cada UM e também calcular as distâncias entre elas.

A frota, atualmente é composta por 15 embarcações do tipo PSV (*Platform Supply Vessel*), possuindo diferentes características técnicas como: tamanho, capacidade de carga, velocidade, consumo de combustível, entre outros, o que a caracteriza como uma frota heterogênea. Dentre as principais cargas transportadas por estas embarcações destacam-se: Fluido de Perfuração, Salmoura, Baritina, Bentonita, Calcário, Parafina e Fluido Sintético. Existem também 03 portos (depósitos) nos quais a frota realiza o carregamento ou descarregamento (menor ocorrência) de suprimentos para atendimento aos pedidos das UM's.

No processo de roteirização e programação das embarcações, algumas premissas devem ser observadas pelo programador de maneira a obter uma distribuição da frota mais eficiente e atender às restrições inerentes do problema. Dentre estas premissas, pode-se destacar as seguintes:

- Os pedidos, candidatos a serem programados, devem ter data de vencimento (data mais tarde) no mínimo em 48 h e no máximo em 72 h. Isto porque pedidos com prazo inferiores a 48 h correm o risco de ter a entrega atrasada devido às grandes distâncias envolvidas na navegação das embarcações. Por outro lado, pedidos com prazo de entrega superior a 72 h ainda estão suscetíveis a alterações, podendo a data de entrega e as quantidades solicitadas serem alteradas, o que pode comprometer a programação realizada;
- A programação das demandas de uma UM, deve prioritariamente, utilizar o menor número possível de embarcações para que seja reduzida a quantidade de visitas a esta UM, otimizando a utilização da frota. Quando não há uma embarcação que possua estoque suficiente para atender à toda demanda da UM, a mesma poderá ser fracionada entre outras embarcações até que seja completamente atendida;
- A soma das quantidades programadas de cada produto a ser entregue nas UM's deve ser menor ou igual ao estoque inicial da embarcação com o roteiro programado (entrega fracionada);
- Na falta de demanda (todos os pedidos atendidos) a partir da última entrega realizada, as embarcações que estiverem ociosas deverão retornar para o porto mais próximo do ponto em que estejam localizadas para o carregamento ou então, caso não necessitem receber carga, aguardar programação nas próximas roteirizações;
- O objetivo principal da programação elaborada pelo programador é atender toda a demanda apresentada, empregando para isto o menor número possível de embarcações e minimizando as distâncias percorridas até o final do roteiro de cada uma delas.

Dentre os produtos solicitados pelas unidades marítimas e possíveis de serem programados, foram considerados aqueles em que é feita apenas a entrega aos clientes (UM's), desprezando-se o fluido de perfuração não-aquoso (FNA) que possui uma logística diferenciada em relação aos demais produtos, por possibilitar o seu reaproveitamento nos

projetos executados, permitindo a coleta e entrega, por vezes simultânea (problema do tipo *Dial-a-Ride*).

Atualmente o programador utiliza sua experiência como principal ferramenta para definir a programação e as rotas de cada embarcação. No entanto, com o aumento do volume de atividades e das distâncias entre os pontos de atendimento (UM's), esta tarefa vem se tornando cada vez mais complexa, exigindo mais tempo de análise e decisão do programador, além de não garantir soluções que otimizem os recursos empregados.

O tema abordado neste trabalho faz parte da classe de problemas de roteirização e programação de veículos. Christiansen, Fagerholt e Ronen (2004) apresentam uma visão geral das publicações relacionadas ao planejamento de transporte aquaviário nos níveis estratégico, tático e operacional, e apresentam detalhes próprios deste tipo de problema.

Na literatura existem diversos trabalhos que abordam problemas de roteirização (HAUGHTON, 2007; RODRIGUES, 2008; MAURI; LORENA, 2009; BELFIORE; YOSHIKAZI, 2009; PARK; KIM, 2010; BRANCHINI; ARMENTANO; LØKKETANGEN, 2010; ARANHA; MONTANÉ; VIANNA, 2012), os quais incorporam restrições operacionais como janelas de tempo, capacidade homogênea/heretogênea da frota, carga fracionada, dentre outras. O trabalho encontrado que aborda um tema mais semelhante ao deste trabalho foi o de Mendes (2007), o qual trata da roteirização e programação de embarcações para executar tarefas de reboque e lançamento de linhas de ancoragem.

### 3. Formulação e modelagem matemática do problema

O problema, aqui tratado, pode ser representado por um grafo não direcionado  $G(V,A)$ , onde  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  é o conjunto de todos os vértices e  $A=\{(v_i, v_j): v_i, v_j \in V\}$  é o conjunto de todas as arestas. Os vértices representam clientes ou embarcações. Cada cliente pode apresentar demandas de vários produtos simultaneamente e cada embarcação pode ofertar vários produtos simultaneamente. Neste trabalho supõe-se que existe um número limitado de clientes e embarcações.

A cada aresta  $(v_i, v_j)$  está associada uma distância não negativa  $d_{ij}$  que representa a distância entre os vértices (clientes/embarcações).

O Problema de roteirização consiste em determinar o conjunto de rotas que deverão ser feitas pelas embarcações minimizando os custos de transporte, dado pela distância e respeitando as seguintes restrições:

- a) Satisfazer a demanda de cada cliente, mesmo que este seja fracionada entre as embarcações;
- b) A soma das quantidades programadas de cada produto a ser entregue aos clientes deve ser menor ou igual ao estoque inicial da embarcação com o roteiro programado;

Assim, para formular matematicamente este problema se devem definir os seguintes parâmetros e variáveis de decisão, descritos na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Símbolo	Definição
$d_{ij}$	Distância entre os nós (clientes/embarcações).

$DEM_{ik}$	Demanda do produto $k$ pelo cliente $i$ .
$CAP_{rk}$	Capacidade de fornecimento do produto $k$ pela embarcação $r$ .
$M$	Número muito grande.
$V$	Conjunto de todos os vértices.
$N$	Subconjunto de $V$ que representa às embarcações.
$C$	Subconjunto de $V$ que representa os clientes.
$P$	Conjunto de todos os $k$ produtos.

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo.

Símbolo	Definição
$x_{rij}$	Variável Binária que indica se a aresta $(i, j)$ esta sendo utilizada pela embarcação $r$ ( $x_{rij} = 1$ ) ou não ( $x_{rij} = 0$ ).
$u_{ri}$	Variável Binária que indica se o cliente $i$ esta sendo atendido pela embarcação $r$ ( $u_{ri} = 1$ ) ou não ( $u_{ri} = 0$ ).
$y_{rij}$	Fluxo em cada aresta $(i, j)$ conduzido pela embarcação $r$ .
$z_{rik}$	Quantidade do produto $k$ fornecido pela embarcação $r$ ao cliente $i$ .

Tabela 2 – Variáveis de Decisão.

Utilizando esta notação, o problema pode ser formulado como um modelo de programação inteira mista:

$$MIN \sum_{r \in N} \sum_{i \in V} \sum_{j \in C} d_{ij} x_{rij} \quad (1)$$

$$s.a. \quad \sum_{i \in V} y_{rij} - \sum_{i \in C} y_{rji} = u_{rj} \quad \forall r \in N, \forall j \in C \quad (2)$$

$$y_{rij} \leq Mx_{rij} \quad \forall r \in N, \forall j \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{rij} = u_{rj} \quad \forall r \in N, \forall j \in C \quad (4)$$

$$\sum_{i \in C} x_{rji} \leq u_{rj} \quad \forall r \in N, \forall j \in V \quad (5)$$

$$\sum_{r \in N} z_{rik} = DEM_{ik} \quad \forall i \in C, \forall k \in P \quad (6)$$

$$\sum_{i \in C} z_{rik} \leq CAP_{rk} \quad \forall r \in N, \forall k \in P \quad (7)$$

$$z_{rik} \leq Mu_{ri} \quad \forall r \in N, \forall i \in V, \forall k \in P \quad (8)$$

$$x_{rij} \in [0,1] \quad \forall r \in N, \forall i \in V, \forall j \in C \quad (9)$$

$$u_{ri} \in [0,1] \quad \forall r \in N, \forall i \in V \quad (10)$$

$$y_{rij} \geq 0 \quad \forall r \in N, \forall i \in V, \forall j \in C \quad (11)$$

$$z_{rik} \geq 0 \quad \forall r \in N, \forall i \in V, \forall k \in P \quad (12)$$

O objetivo (1) é minimizar a distância percorrida pelas embarcações. A equação (2) garante que a rota é conexa, ou seja, a rota inicia na embarcação que irá atendê-la e finaliza no último cliente a ser atendido, após visitar todos os outros clientes associados à rota. A desigualdade (3) assegura que o fluxo na aresta  $(i,j)$  só poderá ocorrer se a aresta  $(i,j)$  esta sendo usada por alguma embarcação. A restrição (4) garante que, deve haver exatamente uma aresta chegando no nó  $j$  vindo da embarcação  $r$ , caso  $j$  seja atendida por  $r$ . Analogamente, a desigualdade (5) assegura que, deve haver no máximo uma aresta saindo no nó  $j$  vindo da embarcação  $r$ . A equação (6) garante que a quantidade atendida do produto  $k$  tem que ser igual à demanda do cliente pelo produto  $k$ . Já que mais de um produto pode ser transportado por uma embarcação, a restrição (7) é introduzida para que a quantidade fornecida do produto  $k$ , por uma determinada embarcação  $r$ , seja menor ou igual a sua respectiva capacidade do produto  $k$ . Devido à desigualdade (8), só poderá haver fornecimento se o cliente é atendido por uma determinada embarcação. O domínio adequado das variáveis é determinado pelas restrições (9), (10), (11) e (12).

## 4. Testes Computacionais

### 4.1 Construção dos cenários de teste

Com o objetivo de testar e validar o modelo matemático proposto foram construídos três cenários distintos para o problema programação e roteirização de embarcações. Para a construção destes cenários, foram utilizados dados obtidos de um banco de dados com informações reais de demanda, estoque, entre outras, permitindo assim uma melhor compreensão do problema abordado e suas restrições.

As localizações das UM's bem como das embarcações foram obtidas através do programa desenvolvido pela equipe de Geodésia da Petrobras chamado GIS-SUB, sendo utilizadas as coordenadas geográficas UTM (N, E).

A seguir são descritos cada um destes cenários e os dados que servirão de entrada no modelo matemático, para a realização dos testes em ambiente computacional.

**Cenário 1:** Neste cenário foram selecionadas 13 (treze) UM's com suas respectivas demandas e 05 (cinco) embarcações com seus estoques iniciais. A Tabela 3 mostra a localização geográfica (coordenadas UTM) das UM's selecionadas e suas demandas para cada produto. Já a Tabela 4 mostra a localização geográfica (coordenadas UTM) e os estoques iniciais de cada uma das embarcações.

UM	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
PUBU	7.700.937	335.708	0	0	0	0	0
SS-20	7.456.149	321.450	0	0	0	0	2.700
SS-37	7.512.102	385.608	0	0	0	170	0
SS-48	7.526.770	376.056	0	0	1.000	0	0
SS-51	7.569.461	422.126	1.500	0	1.000	0	0
SS-54	7.461.879	328.093	0	0	0	0	2.000
SS-55	7.780.770	451.444	2.000	0	1.000	0	0
SS-57	7.641.842	393.344	0	0	0	0	1.400
SS-60	7.640.442	394.444	957	0	0	450	0
SS-69	7.175.285	720.456	0	0	0	332	0
SS-70	7.579.413	424.304	0	0	0	1.000	0
SS-77	7.187.598	730.095	0	0	0	270	0
SS-83	7.208.014	749.472	0	0	0	0	1.800
<b>TOTAL:</b>	<b>13</b>		<b>4.457</b>	<b>0</b>	<b>3.000</b>	<b>2.222</b>	<b>7.900</b>

Fonte: Petrobras

Tabela 3 – Localização Geográfica e Demandas das Unidades Marítimas

Embarcações	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
ASTRO PARGO	7.175.285	720.456	0	0	0	1.279	1.800
CAMPOS CLIPPER	7.187.598	730.095	0	0	129	486	1.400
CBO BIANCA	7.461.879	328.093	0	0	0	1.357	4.481
HOS RESOLUTION	7.700.937	335.708	2.910	807	2.685	2.896	3.264
HOS WILDWING	7.780.770	451.444	2.957	814	2.644	629	0

Fonte: Petrobras

Tabela 4 – Localização e Estoques Iniciais das Embarcações.

**Cenário 2:** Neste cenário, foram selecionadas 12 (doze) UM's e 07 (sete) embarcações. A Tabela 5 mostra a localização geográfica (coordenadas UTM) das UM's e suas demandas para cada produto, enquanto a Tabela 6 mostra a localização geográfica (coordenadas UTM) de cada embarcação bem como seus estoques iniciais para cada produto.



UM	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
NS-15	7.398.950	294.476	0	948	1500	0	0
NS-18	7.517.595	401.869	0	0	1168	0	0
NS-30	7.157.336	685.582	1937	1826	0	0	1944
SS-48	7.526.770	376.056	2000	0	1000	0	0
SS-50	7.557.141	407.843	0	0	0	0	1638
SS-54	7.461.879	328.093	0	0	0	0	840
SS-60	7.640.442	394.444	900	0	0	500	0
SS-61	7.639.213	395.480	700	0	0	500	0
SS-68	7.176.257	718.635	0	0	0	0	2000
SS-78	7.174.205	651.495	2000	0	0	0	0
SS-82	7.393.835	286.575	0	1613	0	0	1500
SS-83	7.208.014	749.472	1423	0	0	0	0
<b>TOTAL:</b>		<b>12</b>	<b>8.960</b>	<b>4.387</b>	<b>3.668</b>	<b>1.000</b>	<b>7.922</b>

Fonte: Petrobras

Tabela 5 – Localização Geográfica e Demandas das Unidades Marítimas

Embarcações	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
CAMPOS CLIPPER	7.176.257	718.635	1.423	0	129	216	3.944
CBO BIANCA	7.174.205	651.495	3.937	1.826	0	0	0
HOS PINNACLE	7.398.950	294.476	222	948	2.668	0	3.248
HOS RESOLUTION	7.396.861	286.899	56	0	3.069	1.900	1.520
SANTOS SUPPORTER	7.700.937	335.708	3.828	1.613	3.960	0	9.900
SAVEIROS ATOBÁ	7.526.770	376.056	3.600	1.631	1.442	1.910	3.148
SAVEIROS TALHA-MAR	7.639.213	395.480	0	0	0	1.452	7.332

Fonte: Petrobras

Tabela 6 – Localização e Estoques Iniciais das Embarcações

**Cenário 3:** Para este cenário foram selecionadas 11 (onze) UM's e 10 (dez) embarcações. A Tabela 7 mostra a localização geográfica de cada uma das UM's com suas respectivas demandas para cada produto, enquanto a Tabela 8 mostra a localização geográfica de cada uma das embarcações como seus respectivos estoques iniciais.

UM	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
NS-15	7.398.950	294.476	1000	0	0	0	0
NS-23	7.495.209	399.873	0	938	0	0	0
NS-32	7.164.973	721.611	0	0	0	0	2600
PMAC	7.521.625	214.970	0	0	0	0	0
SS-45	7.291.851	580.207	0	0	0	0	900
SS-47	7.520.412	393.007	0	0	0	0	1538
SS-51	7.569.461	422.126	0	0	0	500	0
SS-76	7.234.639	730.794	2171	0	0	0	0
SS-77	7.187.598	730.095	0	0	0	108	0
SS-82	7.393.835	286.575	2326	0	0	0	0
SS-83	7.208.014	749.472	0	0	0	346	0
<b>TOTAL:</b>		<b>11</b>	<b>5.497</b>	<b>938</b>	<b>0</b>	<b>954</b>	<b>5.038</b>

Fonte: Petrobras

Tabela 7 – Localização Geográfica e Demandas das Unidades Marítimas

Embarcações	Coordenadas (Norte, Este)		Baritina (ft³)	Bentonita (ft³)	Calcário (ft³)	Parafina (bbl)	CADIT (bbl)
CAMPOS CLIPPER	7.208.014	749.472	0	0	0	616	3.500
CBO BIANCA	7.700.937	335.708	3.756	1.464	0	2.833	6.120
ER ARENDAL	7.398.950	294.476	5.153	2.139	2.460	0	110
HOS PINNACLE	7.700.937	335.708	2.716	378	2.640	800	3.175
HOS WINDANCER	7.571.123	424.251	1.920	940	1.465	735	0
SAVEIROS ATOBÁ	7.520.412	393.007	0	0	442	550	1.649
SAVEIROS PELICANO	7.175.285	720.456	3.555	1.600	1.320	1.625	4.650
SAVEIROS TALHA-MAR	7.700.937	335.708	3.325	1.731	1.567	2.158	8.447
TOISA CREST	7.521.625	214.970	2.402	1.031	522	0	2.853
OLYMPIC ELENA	7.521.625	214.970	3.331	1.686	1.588	0	800

Fonte: Petrobras

Tabela 8 – Localização e Estoques Iniciais das Embarcações

## 4.2 Análise dos resultados

O modelo de programação matemática desenvolvido foi implementado no software de otimização LINGO 10.0. Os testes foram executados utilizando a seguinte configuração de hardware: processador AMD Turion-X2 2.20 GHz, memória RAM de 4.0 GB e sistema operacional Windows 7 de 64 bits. A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados.

Cenário	Tempo de Processamento	Iterações	Distância percorrida (km)
1	00:01:49	282.594	317
2	00:02:11	637.611	719
3	00:08:58	3.251.734	739

Tabela 9 – Resultados computacionais no LINGO 10.0

Como pode ser observado, para os Cenários 1 e 2 as soluções ótimas foram encontradas num tempo de processamento relativamente pequeno. Já para o Cenário 3 o tempo de processamento foi maior devido à complexidade do problema.

Para avaliar a viabilidade e eficiência do modelo, foram comparados os resultados obtidos com os roteiros construídos intuitivamente pelos programadores/decisores da empresa.

Na Tabela 10 pode-se verificar que o modelo proposto obteve melhores resultados que o adotado pelos decisores da empresa. Em alguns casos obteve-se um ganho de 80% nas distâncias percorridas.

Cenário	Distância percorrida (km)		% de ganho
	Modelo proposto	Decisor	
1	317	1615	80%
2	719	965	25%
3	739	1010	27%

Tabela 10 – Resultados computacionais no LINGO 10.0

É importante ressaltar, que o problema abordado neste estudo é um problema de otimização combinatória de alta complexidade computacional, sendo do tipo *NP-Hard*. À medida que o número de UM's e embarcações aumentam, o tempo computacional requerido pelos métodos exatos se eleva de forma exponencial.

Testes mostraram que, para instâncias maiores, as soluções ótimas são praticamente impossíveis de serem obtidas em um tempo computacional hábil, se comparado com o tempo que tem o programador para construir a programação e roteirização das embarcações da frota.

## 7. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver um modelo inicial de otimização para auxiliar ao decisor na programação e elaboração dos roteiros das embarcações de uma determinada frota no ambiente *off-shore*.

Primeiramente, foi realizada uma análise e levantamento do domínio do problema com ajuda dos próprios decisores, sendo identificada uma série de restrições inerentes ao problema bem como possíveis métricas para avaliação das decisões.

Como proposta inicial foi construído um modelo de programação inteira-mista que atenda a toda a demanda das UM's, empregando para isto o menor número possível de embarcações e minimizando as distâncias percorridas até o final do roteiro de cada uma delas.

O modelo foi executado sobre três cenários baseados em dados reais e os resultados obtidos foram comparados com os encontrados pelo decisor da empresa. Estes resultados foram considerados satisfatórios uma vez que em pouco tempo de execução chegou a atingir até 80% de melhora em relação à programação do decisor.

Como trabalho futuro, pretende-se adicionar outras restrições ao modelo como por exemplo, janela de tempo, coleta-entrega, limite de combustível, dentre outros. Também serão desenvolvidas heurísticas para abordar problemas de grande porte.

## Referências

**ARANHA, M. T. S.; MONTANÉ, F. A. T. & VIANNA, D. S.** *Heurísticas para o problema de transporte terrestre de pessoas da petrobras na Bacia de Campos*. Submetido ao Brazilian Journal of Operations & Production Management, 2012.

**BELFIORE, P. & YOSHIKAZI, H.T. Y.** *Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in Brazil*. European Journal of Operational Research, Vol. 199, pp. 750-758, 2009.

**BRANCHINI, R. M.; ARMENTANO, V. A. & LØKKETANGEN, A.** *Adaptive granular local search heuristic for a dynamic vehicle routing problem*. Computers & Operations Research, Vol. 36, pp. 2955-2968, 2009.

**CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K & RONEN, D.** *Ship routing and scheduling: status and perspectives*. Transportation Science, 38:1, p. 1-18, 2004.

**HAUGHTON, M. A.** *Assigning delivery routes to drivers under variable customer demands*. Transportation Research, Part E, Vol. 43, pp. 157-172, 2007.

**MAURI, G. R. & LORENA, L. A. N.** *Uma nova abordagem para o problema dial-a-ride*, Produção, Vol. 19, No. 1, pp. 041-054, 2009.

**MENDES, A.B.** *Programação de Frota de Apoio a Operações "Offshore" sujeita à requisição de Múltiplas Embarcações para uma mesma Tarefa*. Tese de doutorado em Engenharia apresentada à Escola Politécnica da USP, 2007.

**PARK, J. & KIM, B.** *The school bus routing problem: A review.* European Journal of Operational Research, Vol. 202, pp. 311-319, 2010.

**RODRIGUES, S. B.** *Metaheurística Colônia de Formigas aplicada a um Problema de Roteamento de Veículos: caso da Itaipu Binacional.* In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008.

**SIKILERO, C. B.** *Contribuição das características logísticas para as prioridades competitivas: um estudo de caso em uma empresa da indústria de refrigerantes.* Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos. 2009.

**SILVA, G. L.** *Uma nova abordagem para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais.* Tese (Doutorado em Transportes)-Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

**SLACK, N.; CHAMBERS, S; HARRISON, A. & JOHNSTON, R.** *Administração da Produção.* São Paulo: Atlas, 2009.