

Universidade Federal de Santa Catarina  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Produção

**MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE  
HELICÓPTEROS PARA UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO  
FÍSICA DE PESSOAS VOLTADO ÀS ATIVIDADES OFFSHORE  
DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE UMA BACIA  
PETROLÍFERA – ESTUDO DE CASO**

**Pedro Paulo Forain Rocha**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito parcial para obtenção  
do título de Mestre em  
Engenharia de Produção

**Florianópolis  
2001**

Pedro Paulo Forain Rocha

**MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE  
HELICÓPTEROS PARA UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO  
FÍSICA DE PESSOAS VOLTADO ÀS ATIVIDADES OFFSHORE  
DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE UMA BACIA  
PETROLÍFERA – ESTUDO DE CASO**

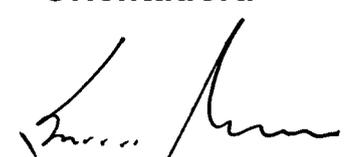
Esta dissertação foi julgada e aprovada para a  
obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**  
no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 17 de maio de 2001

  
**Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.**  
**Coordenador do Curso**

**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof.ª Mirian Buss Gonçalves, Dr.ª.**  
**Orientadora**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.**  
**Membro**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Antônio Sérgio Coelho, Dr.**  
**Membro**

A minha esposa Liz  
Aos meus filhos Matheus e Bettina  
Aos meus pais

## Agradecimentos

À professora Miriam Buss Gonçalves por sua precisa orientação.  
Aos demais professores do curso de Pós-graduação.  
A Lina Márcia Pereira pelo seu dedicado apoio na edição do trabalho.  
A Ricardo da Silva Freire e a Paulo Rodrigo Monteiro de Barros Magalhães  
pelo indispensável suporte na programação e uso do software.  
A Universidade Federal de Santa Catarina pelo inovador projeto de ensino.  
A PETROBRAS pela oportunidade.  
A DEUS por tudo.

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>1.1 Justificativa do Trabalho.....</b>	<b>01</b>
<b>1.2 Objetivo.....</b>	<b>03</b>
<b>1.3 Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>04</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO.....</b>	<b>06</b>
<b>2.1 Introdução.....</b>	<b>06</b>
<b>2.2 Componentes do Sistema Logístico.....</b>	<b>06</b>
2.2.1 Aeródromos.....	07
2.2.2 Unidades marítimas.....	08
2.2.3 Helicópteros.....	12
<b>2.3 Operação do Sistema Logístico.....</b>	<b>14</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Dimensionamento de Frota.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Alguns Modelos Existentes.....</b>	<b>19</b>
3.3.1 Modelo de David Kirby (1959).....	19
3.3.2 Modelo de J. K. Wyatt (1961).....	20
3.3.3 Modelo de J. Gould (1969).....	22
3.3.4 Modelo de R. H. Mole (1975).....	25
3.3.5 Modelo de Parikh (1977).....	26
3.3.6 Modelo de Etezadi e Beasley (1983).....	27
<b>3.4 Seleção do Modelo.....</b>	<b>32</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>35</b>

<b>4.1 Introdução.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Caso Logístico.....</b>	<b>36</b>
4.2.1 Aeródromos.....	40
4.2.2 Unidades marítimas.....	43
4.2.3 Helicópteros.....	45
4.2.3.1 Modelo Sikorsky 61N ( S-61N ).....	47
4.2.3.2 Modelo Sikorsky 76A ( S-76A ).....	48
4.2.3.3 Modelo Eurocopter SA-330J ( PUMA ).....	49
4.2.3.4 Modelo BELL 412 SP ( B-412 ).....	50
4.2.3.5 Modelo BELL 212 ( B-212 ).....	51
4.2.3.6 Custos de afretamento.....	52
4.2.4 Operação.....	52
4.2.5 Dimensionamento atual.....	54
<b>4.3 Adaptação do Modelo.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Dados do Problema.....</b>	<b>59</b>
<b>4.5 Programa Utilizado.....</b>	<b>63</b>
<b>4.6 Resultados.....</b>	<b>64</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>6 FONTES BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
6.1 Bibliografia Principal.....	67
6.2 Bibliografia Complementar.....	68
<b>7 ANEXOS .....</b>	<b>69</b>
7.1 Anexo – Demandas Diárias das Unidades Marítimas.....	69
7.2 Anexo – Programa Fonte.....	72

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Tipos de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo.....	11
Figura 3.1: Perfil da demanda ao longo de um ciclo.....	21
Figura 4.1: Mapa dos campos de petróleo descobertos pela PETROBRAS na Bacia de Campos até 1990.....	38
Figura 4.2: Mapa dos campos de petróleo descobertos pela PETROBRAS na Bacia de Campos até 1996.....	39
Figura 4.3: Fotografia aérea do Aeroporto de Macaé, RJ.....	41
Figura 4.4: Fotografia aérea do Heliporto de São Tomé em Campos, RJ.....	42
Figura 4.5: Mapa de localização do aeroporto de Macaé e do heliporto de São Tomé.....	43
Figura 4.6: Fotografia de helicóptero do modelo S – 61.....	47
Figura 4.7: Fotografia de helicóptero do modelo S – 76A.....	48
Figura 4.8: Fotografia de helicóptero do modelo AS – 330J (PUMA).....	49
Figura 4.9: Fotografia de helicóptero do modelo B – 412.....	50
Figura 4.10: Fotografia de helicóptero do modelo B – 212.....	51

## Lista de Quadros

Quadro 1.1: Distribuição física de pessoas em bacias Petrolíferas .....	01
Quadro 7.1: Programa Fonte e Resultados.....	72

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Características dos modelos de dimensionamento de frota apresentados....	34
Tabela 4.1: Taxas de afretamento de helicópteros em operação em São Tomé.....	52
Tabela 4.2: Dados operacionais das aeronaves em atuação em São Tomé.....	53
Tabela 4.3: Distâncias das Unidades Marítimas a São Tomé.....	59
Tabela 7.1: Demandas diárias das Unidades Marítimas por São Tomé.....	69

## Resumo

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo matemático de dimensionamento de frota de helicópteros, compatível com um sistema de distribuição física de pessoas e adequado à utilização no planejamento de frota voltada ao atendimento às atividades *offshore* de exploração e produção de uma bacia petrolífera.

Este desenvolvimento divide-se em duas partes: A primeira uma investigação bibliográfica, onde se busca na literatura científica identificar alguns modelos matemáticos apropriados ao uso para o dimensionamento de frota, entre os quais selecionou-se o modelo de Etezadi e Beasley (1983), pela sua adequação, simplicidade e facilidade de aplicação, e sobre o qual algumas adaptações foram necessárias para sua utilização no problema em questão. Em um segundo momento, a seleção do modelo de Etezadi e Beasley (1983) é referendada através do estudo de caso feito a partir das operações da PETROBRAS na Bacia de Campos, apresentando resultados muito próximos ao obtido pelo método empírico, atualmente praticado.

## **Abstract**

The present dissertation consists of the development of a mathematical model to size an helicopter fleet. This model should be adequate for the planning of a fleet used in the distribution of people employed in the exploration and production activities of an offshore petroleum basin.

This work is divided in two parts: The first is a review of the technical literature in order to identify appropriate models for this scenario. The work of Etezadi and Beasley (1983) has been selected, due to its simplicity and fitness for the purpose of this application, although, some changes had to be carried out to use it in this study. The second part is the application of the mentioned model to the helicopter fleet of Campos Basin, where Petrobras has offshore operations. The results showed good agreement with the empirical approach that is currently used.

# 1 INTRODUÇÃO

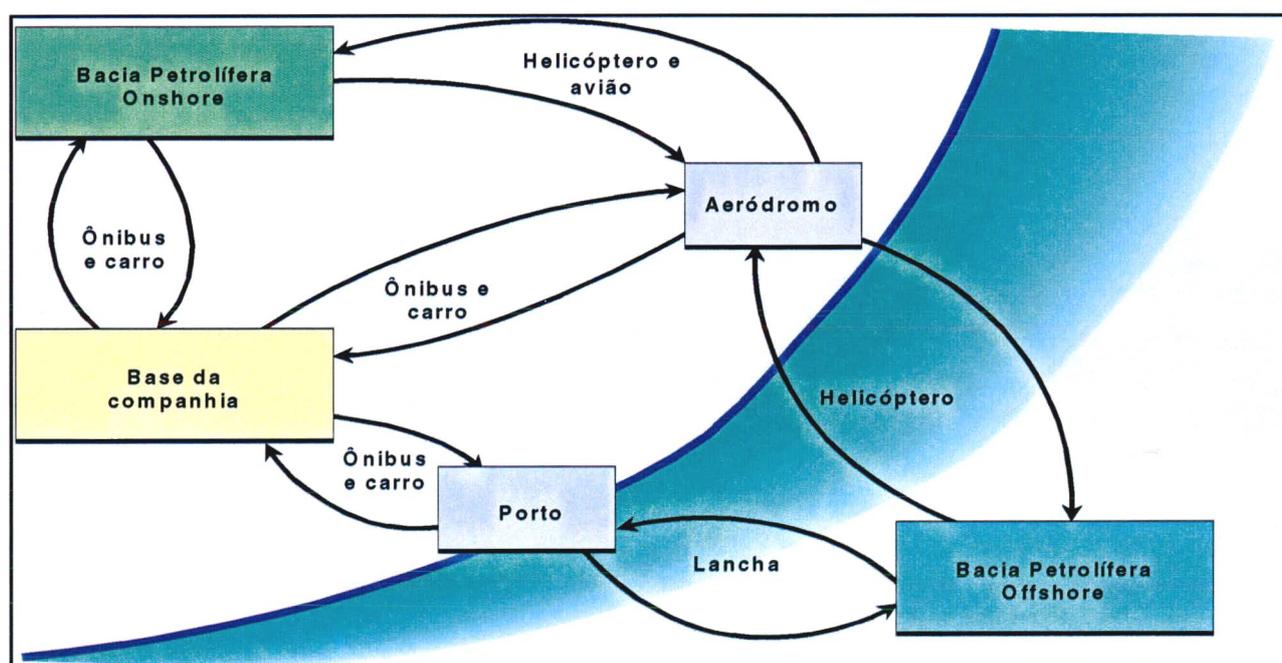
## 1.1 Justificativa do Trabalho

Em toda atividade *onshore*<sup>1</sup> e *offshore*<sup>2</sup> de exploração e produção de uma bacia petrolífera, está presente o processo de distribuição física de pessoas, que pode ser realizado tanto por via marítima (através de lanchas), como por via aérea (através de helicópteros), ou como também por via terrestre (através de carros leves, vans e ônibus). A seleção do modal é estabelecida de acordo com as condições geográficas e ambientais locais, associadas às distâncias envolvidas.

Esta dissertação, entretanto, limita-se a tratar exclusivamente do processo relativo às atividades *offshore*, e mais do que isto, da distribuição física de pessoas por via aérea.

O quadro seguinte ilustra, de forma simplificada, a configuração geral de um sistema de distribuição física de pessoas voltado às atividades de exploração e produção em uma bacia petrolífera.

Quadro 1.1: Distribuição física de pessoas em bacias petrolíferas.



Fonte: Quadro desenvolvido especialmente para a dissertação.

<sup>1</sup> Onshore - Terrestre

<sup>2</sup> Offshore - Marítima

Assim como em outros ramos de negócios, na atividade de exploração e produção de petróleo não é possível decidir sobre a localização e extensão de sua área de atuação, baseado apenas em critérios exclusivamente técnicos e econômicos. Estas atividades se desenvolvem somente sobre bacias sedimentares, e mais do que isto, onde existe comprovadamente petróleo, ou pelo menos seja provável a sua existência. Como se pode depreender, a atividade de exploração e produção “não escolhe endereço”, diferentemente, por exemplo, da atividade de refino da indústria do petróleo, que estabelece a localização de suas instalações a partir de critérios técnicos, econômicos e políticos, buscando sempre maior proximidade dos mercados consumidor e fornecedor. Desta forma é comum se observar em bacias petrolíferas, principalmente *offshore*, sistemas logísticos envolvendo grandes distâncias entre suas infra-estruturas logísticas (portos, aeródromos e armazéns) e suas áreas de interesse, áreas estas, onde se situam as instalações marítimas de exploração e produção.

Esta realidade impõe esforços constantes de otimização e racionalização das operações e recursos de logística, dos quais este trabalho faz parte e se propõe a contribuir.

A tarefa de dimensionamento da frota de helicópteros para as operações *offshore* em uma bacia petrolífera, além de se constituir em um complexo problema logístico, se revela em uma grande oportunidade de redução de custos, face à grande quantidade de recursos normalmente necessários e aos altos valores envolvidos.

Por estas razões, acrescidas às perspectivas de crescimento das atividades de exploração e produção, movidas principalmente pela progressiva elevação dos preços do petróleo no mercado internacional, o dimensionamento da frota de helicópteros, para atendimento a uma Bacia Petrolífera *offshore*, foi selecionado como problema de Logística, a ser tratado nesta dissertação de mestrado.

## 1.2 Objetivo

Esta dissertação de mestrado consiste no desenvolvimento de uma proposta de modelo de dimensionamento de frota de helicópteros para um sistema de distribuição física de pessoas voltado às atividades *offshore* de exploração e produção de uma bacia petrolífera, a ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão no planejamento de transportes. Complementando o trabalho, é feito um estudo de caso com a aplicação deste modelo ao caso logístico real de distribuição física de pessoas, ambientado na Bacia de Campos, em operações da PETROBRAS.

Cabe inicialmente apresentar as duas situações típicas em que as companhias são motivadas, ao planejar suas atividades de transportes, a buscar o dimensionamento ótimo de suas frotas de veículos:

- Companhias cujo negócio é transportar pessoas ou materiais para outras companhias, e neste caso procuram a maximização do lucro;
- Companhias que, embora possuam frota própria ou alugada, seu negócio não é transporte, e portanto procuram a minimização do custo com transporte.

A opção feita nesta dissertação é a de tratar o dimensionamento da frota sob o ponto de vista da minimização do custo com transporte. Convém ressaltar que no desenvolvimento deste estudo não é tratada a otimização da frota, sob o ponto de vista de mínimo custo total da atividade de exploração e produção, o que tornaria a análise muito mais ampla e complexa do que a abordagem aqui pretendida.

Portanto o objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo de dimensionamento de frota de helicópteros para atendimento à demanda de transporte de

peças das atividades *offshore* de exploração e produção de uma bacia petrolífera, tendo como função objetivo a minimização dos custos, e como premissa básica a garantia do atendimento total desta demanda.

Como objetivo específico, e de forma a avaliar a adequação do modelo selecionado ao problema em questão, é feito um estudo de caso aplicado às operações da PETROBRAS na Bacia de Campos.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

O desenvolvimento da dissertação divide-se em: apresentação do problema, pesquisa bibliográfica e seleção do modelo a utilizar, adaptação do modelo ao problema de interesse, aplicação a um caso real e as conclusões finais.

No capítulo 2, que trata da apresentação do problema, são descritos o sistema logístico em estudo: seus componentes e suas respectivas variáveis e restrições, e por fim, as características de operação deste sistema .

No capítulo 3 é feita uma investigação bibliográfica do que se dispõe sobre a matéria dimensionamento de frota, identificando e caracterizando alguns modelos representativos da evolução no tratamento deste tema, e encerrando com a seleção de um modelo adequado à utilização em problemas de distribuição física de pessoas, por via aérea, em uma bacia petrolífera, acompanhada das justificativas desta escolha.

No decorrer do capítulo 4, que trata do estudo de caso, é feita inicialmente a apresentação de um caso logístico real, ambientado na Bacia de Campos em operações da PETROBRAS. Em seguida são identificadas as adaptações necessárias a serem aplicadas ao modelo selecionado no capítulo 3. Posteriormente são apresentados os dados do problema e uma descrição breve do *software* de programação linear utilizado.

Ao final são mostrados os resultados do estudo de caso, que são comparados com os obtidos através do método empírico, que vem sendo adotado atualmente pela PETROBRAS, em seu dimensionamento de frota de helicópteros.

O trabalho se encerra ao capítulo 5 , com as conclusões finais que recomendam a utilização do modelo para problemas de mesma natureza pela sua simplicidade e facilidade de aplicação , qualidades estas fundamentais para a fase de planejamento, pela necessidade de simulação e avaliação de cenários diversos. A confirmação da adequação do modelo selecionado se dá pelos resultados obtidos no estudo de caso correspondendo às expectativas obtidas a partir do modelo empírico vigente no estudo de caso em questão.

## **2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo é feita, inicialmente, a apresentação dos principais componentes do sistema logístico, sobre o qual se desenvolve este trabalho, e que vem a ser o sistema de distribuição física de pessoas, por via aérea, em atendimento às atividades *offshore* de exploração e produção de uma bacia petrolífera, suas variáveis e restrições associadas.

Em seguida são descritas as principais características da operação deste sistema, que integradas aos demais componentes do sistema logístico em estudo, compreendem o conjunto total de variáveis e restrições do modelo a ser desenvolvido.

### **2.2 Componentes do Sistema Logístico**

O problema típico de logística de distribuição aérea *offshore* de passageiros, para as atividades de exploração e produção de uma bacia petrolífera, envolve variáveis e restrições relacionadas direta ou indiretamente aos componentes deste sistema logístico, a saber : Aeródromos , Unidades Marítimas e Helicópteros.

Os elementos apresentados a seguir estão sempre presentes e são característicos de qualquer sistema logístico de distribuição física aérea de pessoas, em uma bacia petrolífera *offshore*.

## 2.2.1 Aeródromos

Aeródromo é toda a área destinada a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves. Os aeródromos podem possuir, ou não, pistas de rolamento. No primeiro caso, são conhecidos como aeroportos, e no segundo, como heliportos.

Os heliportos, os quais são abordados em mais detalhes em 2.2.2, não são classificados como aeródromos, por não permitirem a movimentação de aeronaves.

Os aeródromos são classificados, de acordo com a sua forma de administração, em : Militar, Civil, Comunitário, Privado, Público, Restrito e Transitório, sendo:

- Aeródromo Militar; Destinado para uso de aeronaves militares.
- Aeródromo Civil: Destinado para uso de aeronaves civis.
- Aeródromo Comunitário: Destinado a servir pequenas cidades, para utilização com aeronaves leves, vedada à operação da aviação regular.
- Aeródromo Privado: Aeródromo Civil que só pode ser utilizado com autorização de seu proprietário, sendo vedado sua utilização comercial. Atualmente o D A C (DAC – Departamento de Aviação Civil – do Comando da Aeronáutica) poderá autorizar operação da aviação regional neste tipo de aeródromo.
- Aeródromo Público: Aeródromo Civil destinado ao tráfego de aeronaves em geral.
- Aeródromo Restrito: Aeródromo Público, construído em área de propriedade pública, de uso reservado do órgão que o construiu e que o tem sob sua administração, cuja exploração comercial é vedada, só podendo ser utilizado com autorização da respectiva entidade pública.
- Aeródromo Transitório: Aeródromo Civil, para uso provisório e destinado a atender aos projetos de desenvolvimento, construção de estradas, usinas, barragens, proteção a

lavouira, pesquisa mineral ou exploração de jazida e situações de emergência em calamidade pública.

Nas atividades, tanto *onshore* como *offshore* de exploração e produção, que fazem uso do transporte aéreo de pessoas e cargas, os aeródromos são, invariavelmente, operados como autênticos centros de distribuição física (CD), e portanto as suas localizações podem representar grandes oportunidades de economia, pelas distâncias envolvidas, que afetam diretamente o dimensionamento de recursos de transporte necessários.

Entretanto não é escopo deste estudo, a averiguação da melhor localização destes centros de distribuição ( aeroportos ou heliportos), assumindo-se como premissa básica que suas localizações já estão estabelecidas e são conhecidas.

## 2.2.2 Unidades marítimas

O termo genérico Unidades Marítimas é utilizado para se referir a qualquer instalação marítima voltada às funções de exploração e produção da indústria do petróleo. Estas unidades podem ser, basicamente, plataformas ou navios.

### Plataformas

As plataformas se dividem em fixas ou móveis (flutuantes e auto-eleváveis) e se caracterizam por:

- **Fixas :**

Se constituem de superestruturas apoiadas no solo marinho através de estrutura metálica fixa, conhecida como jaqueta.

São concebidas do ponto de vista de projeto, como estruturas civis.

Sua aplicação se dá exclusivamente em lâminas d'água rasas e em atividade de produção, pela sua incapacidade de se movimentar, requisito este fundamental para a atividade exploratória.

- Móveis :

- Flutuantes ou Semi-Submersíveis :

Instalações que permanentemente flutuam e que podem ser posicionadas sobre as áreas de interesse tanto através de sistemas de ancoragem (âncoras, amarras, cabos e bóias), como através de sistemas de posicionamento dinâmico, sendo estes, sofisticados sistemas que integram, através de um *software*, o monitoramento da posição da unidade marítima e o seu sistema de governo (manobra), atuando continuamente no sentido de manter a sua posição sobre a locação de interesse.

Sua configuração se compõe de uma superestrutura ,sobre a qual se instalam as plantas de processos, sondas de perfuração, acomodações e tanques, como em qualquer outra plataforma, estando esta superestrutura apoiada sobre estruturas tubulares esbeltas, chamadas de pernas, que por sua vez se apoiam sobre estruturas submersas, chamadas de submarinos, que garantem a flutuação de todo conjunto, pela ação do empuxo.

São concebidas do ponto de vista de projeto como estruturas navais, e portanto classificadas, para todos efeitos, como embarcações.

Estas unidades marítimas são apropriadas às lâminas d'água intermediárias, no caso de sistemas ancorados, e às lâminas d'água profundas, no caso de sistemas de posicionamento dinâmico. Por estas razões, atualmente sua utilização vem aumentando consideravelmente, tanto nas fases de exploração como de produção.

### Auto-Eleváveis ou “*Jack-ups*”:

Estas unidades são estruturas híbridas, ora fixas (durante as operações), ora flutuantes ( durante as mudanças de locação ).

Suas pernas se movimentam em relação a balsa (superestrutura semelhante às demais plataformas, porém com estanqueidade suficiente que permita a flutuação de toda a unidade).

Para sua fixação sobre a locação, suas pernas são arriadas até tocar o solo marinho, momento a partir do qual a balsa passa a se elevar em relação à superfície d'água, contribuindo com o seu próprio peso para a cravação das sapatas (extremidades inferiores das pernas).

Para o abandono da locação o processo se dá de forma inversa, a balsa é arriada até tocar a superfície d'água, momento a partir do qual o empuxo passa a atuar sobre a mesma, e que auxiliado pela ação de um sistema de jatos d'água sobre as sapatas, em conjunto atuam para desenterrar as sapatas do fundo do mar. A partir do desprendimento total das sapatas, as pernas são elevadas para então se proceder a navegação para uma nova locação, normalmente por reboque.

O movimento relativo de suas pernas em relação à balsa se dá por ação de sistema hidráulico ou mecânico, usualmente constituído por conjunto de cremalheiras ou cunhas.

Do ponto de vista de sua concepção é vista como estrutura naval, e portanto embarcação.

Este tipo de unidade marítima é especificado para operações em lâminas d'água rasas, tendo sido largamente utilizado na atividade de exploração, juntamente com as fixas na atividade de produção, no início do desenvolvimento das atividades de petróleo da Bacia de Campos. Atualmente, pelo avanço das atividades para águas cada vez mais profundas, teve seu uso praticamente reduzido a zero naquela região.

## Navios

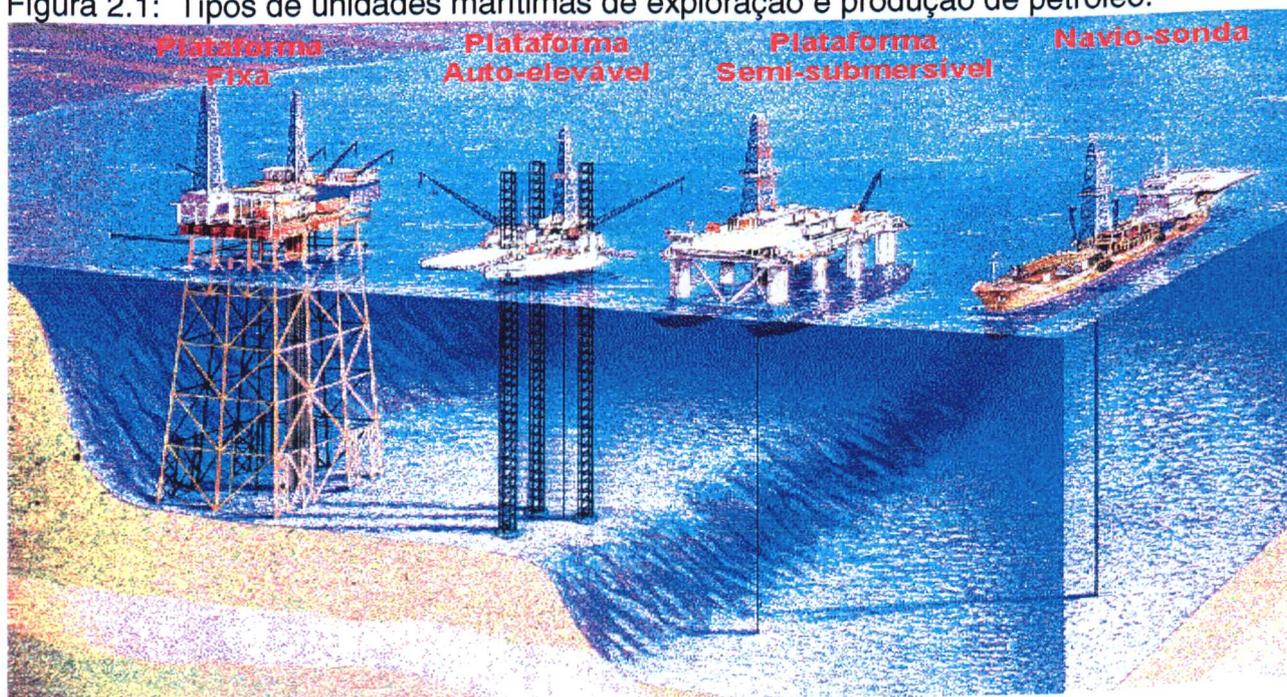
Este tipo de unidade dispensa maiores esclarecimentos, por ser de amplo conhecimento geral.

No entanto, cabe dizer que da mesma forma que as plataformas flutuantes, podem possuir sistemas de ancoragem ou possuir sistemas de posicionamento dinâmico.

Sua aplicação, desta forma, é a mesma daquelas unidades marítimas, diferenciando-se basicamente pelo seu menor custo de construção e pela sua maior dificuldade de se manter em posição, face sua maior resposta à ação das ondas, que atuam diretamente sobre a sua grande área de costado, efeito este bem menos sensível em plataformas semi-submersíveis, por incidir somente sobre as estruturas tubulares de suas pernas, estando fora do alcance das ondas, as superestruturas, que estão razoavelmente acima da superfície d'água, assim como os submarinos, que se encontram submersos.

A figura a seguir expressa, de forma geral, a configuração típica das diferentes categorias de unidades marítimas de Exploração e Produção de petróleo.

Figura 2.1: Tipos de unidades marítimas de exploração e produção de petróleo.



Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

Feita a apresentação das peculiaridades de cada tipo de unidade marítima, resta descrevê-las como clientes que são em um processo de distribuição física de pessoas (foco da dissertação) e de cargas. Como clientes, suas principais características são aquelas relativas ao perfil de suas demandas. Estas demandas variam de unidade para unidade em relação às suas quantidades e frequências, que associadas às distâncias que se encontram do centro de distribuição, se constituem em variáveis obrigatórias a serem consideradas em um modelo de dimensionamento de frota.

Além destas variáveis, surgem algumas vezes, como restrição, a limitação de algumas unidades marítimas para operação com determinados modelos de helicópteros, pelas capacidades máximas de seus helipontos, tanto do ponto de vista de resistência estrutural ao peso, como pelas suas dimensões.

### 2.2.3 Helicópteros

Algumas definições descrevem o helicóptero como sendo um avião sem asas, que se sustenta no ar pela ação de uma grande hélice horizontal, chamada de rotor principal, e que orienta seu curso por ação de uma outra hélice menor, normalmente instalada em sua cauda, chamada de rotor anti-torque, ou rotor de cauda. Em outras definições o helicóptero é descrito como uma aeronave de asa rotativa, enquanto os aviões são definidos como aeronaves de asa fixa.

Independente da forma de se diferenciar o helicóptero, em sua concepção, em relação ao avião, sua principal característica, de caráter operacional, e que o distingue substancialmente do avião é a sua capacidade de se mover independentemente nas três direções e nos seis sentidos, e de poder girar, também independentemente, sobre os três planos (vertical longitudinal, vertical transversal e horizontal).

Todos estes movimentos são possíveis pela ação combinada do rotor principal, que além do giro de sua hélice pode inclinar o seu plano de giro, como também pela ação do rotor anti-torque. Ambos rotores podem ainda alterar o ângulo de ataque de suas pás girando-as ao redor de seus respectivos eixos, variando assim, o passo das hélices e conseqüentemente o seu efeito de sustentação, empuxo ( *lift* ), podendo aumentá-lo, reduzi-lo ou até mesmo anulá-lo, sem necessariamente alterar suas rotações.

Estas características lhe conferem sua maior vantagem relativa ao avião, que é a de não necessitar de pista para o pouso ou decolagem, característica esta determinante na sua seleção para operação em instalações marítimas de exploração e produção de petróleo, assim como, embora não impeditivas de uso de aviões, em instalações terrestres de exploração e produção de petróleo.

As capacidades reais de transporte dos diversos tipos de helicópteros, as quais estão limitadas em seu máximo ao número de assentos disponíveis em cada modelo de aeronave, variam a depender das distâncias envolvidas em cada missão, em função da maior ou menor necessidade de abastecimento de combustível, e se constituem em variável fundamental a ser considerada em qualquer problema de dimensionamento de um sistema de distribuição física de pessoas por helicópteros, que busque identificar a composição ótima de frota.

Diferenciam-se, também, os modelos de helicópteros, pelas suas velocidades de cruzeiro, variável esta que junto com a variável de distância, permitem calcular o tempo de duração de cada missão, desde que considerados os procedimentos de pouso e decolagem, períodos estes com trajetórias e velocidades específicas, que resultam em velocidades médias de avanço diferentes da velocidade de cruzeiro.

Tão importante quanto as variáveis acima, no outro lado da balança, está o custo com a frota própria e alugada de aeronaves. Este custo normalmente compreende uma parcela fixa mensal e outra parcela variável por hora voada.

Há que se considerar, como significativa restrição para aeronaves, a sua autonomia, dado o seu elevado consumo de combustível ( querosene de aviação ). Esta autonomia pode ser expressa em volume de combustível, em tempo de voo, ou ainda, em distância a percorrer, sendo estas duas últimas mais comuns de serem utilizadas como restrições, específicas de cada modelo de helicóptero, para realização das missões.

Por fim, os tipos de helicópteros podem ainda se diferenciar pelas suas dimensões e peso, que podem implicar em restrições à operação em determinados helipontos de unidades marítimas , tanto pelas resistências estruturais destas instalações como pelas suas dimensões.

A definição dos tipos de helicópteros a utilizar bem como de suas quantidades, em última instância, representam o objetivo final do dimensionamento de frota.

Em função dos diferentes tipos de helicópteros possuírem desempenhos relativos ótimos a depender da conjugação dos fatores mencionados acima, faz-se necessário que o modelo de dimensionamento considere o efeito destas influências sobre a capacidade de transporte de pessoas , e que, de forma ágil auxilie no planejamento da frota.

### **2.3 Operação do Sistema Logístico**

Em geral, por determinação do órgão regulamentador da aviação civil ( DAC – Departamento de Aviação Civil – do Comando da Aeronáutica ), o transporte aéreo *offshore* de passageiros está restrito à operação diurna, ou melhor, à operação a luz do dia. Esta limitação restringe estas operações, em média no ano, a nove horas diárias, restrição esta que não pode ser esquecida no dimensionamento de helicópteros, pois estabelece a campanha máxima diária, em tempo, aplicável a qualquer helicóptero.

Uma outra característica operacional que afeta diretamente as autonomias dos diversos tipos de aeronaves, e portanto, limitadora de suas missões (viagens) máximas

de atendimento, diz respeito ao procedimento de controle do vôo, que pode ser visual ou por instrumentos. Esta classificação depende do tipo de homologação do DAC ( Departamento de Aviação Civil ) dada a cada aeronave, e além disto, também ao tipo de homologação dada ao aeródromo que está controlando as operações em questão, podendo ser IFR<sup>3</sup>, para vôos por instrumento, ou VFR<sup>4</sup>, para vôos visuais.

Portanto, a depender do tipo de homologação tanto da aeronave como do aeródromo, o cálculo das autonomias deve atender aos seguintes requisitos estabelecidos pelo órgão de aviação civil :

### Vôo VFR

Para que uma missão possa ser realizada em vôo VFR, considerando o vento e as condições atmosféricas conhecidas, a aeronave tem que ter combustível suficiente para voar até o ponto de destino, assumindo consumo normal em velocidade de cruzeiro.

- Durante o dia, voar em velocidade de cruzeiro mais 20 minutos, no caso de helicópteros e 30 minutos no caso de aviões.
- À noite, voar em velocidade cruzeiro mais 30 minutos no caso de helicópteros e 45 minutos no caso de aviões.

### Vôo IFR

Para que uma missão possa ser realizada em vôo IFR, considerando o vento e as condições atmosféricas conhecidas, a aeronave tem que ter combustível suficiente para voar até o ponto de destino, assumindo consumo normal em velocidade de cruzeiro.

- Completar o vôo até o aeródromo de destino previsto para o primeiro pouso;
- Voar desse aeródromo até o aeródromo de alternativa e;
- Voar, depois disso, mais 30 minutos no caso de helicópteros e 45 minutos no caso de aviões.

---

<sup>3</sup> IFR ( *Instrument Flight Rules* ) – Regras de Vôo por Instrumentos

<sup>4</sup> VFR ( *Visual Flight Rules* ) – Regras de Vôo Visual

Independente da operação ser IFR ou VFR, caso não se disponha de reabastecimento no destino, deverá ser considerado como destino citado na legislação a própria origem, ou seja, combustível para ida e volta mais as reservas previstas.

No caso de operações *offshore* e sobre a selva, independente de haver ponto de reabastecimento no destino, o planejamento é executado não considerando esse reabastecimento, ou seja, considera-se combustível para ida e volta ( ou até alternativa confiável) mais as reservas, devido à probabilidade de não ser possível o reabastecimento por falta de condições para pouso ou deficiência no reabastecimento.

Como pode ser observado, o voo IFR demanda maior necessidade de combustível que o voo VFR, isto por possuir procedimentos de voo mais amarrados em termos de rotas, aproximação, pouso e decolagem e altitudes, que resultam em missões mais longas que quando em voo visual. Entretanto é reconhecida a operação IFR, como a mais segura.

Resta ainda esclarecer que a depender das regras de voo serem para voo visual ou por instrumento, os seus respectivos procedimentos de aproximação, pouso e decolagem, tanto nas unidades marítimas, como nos aeródromos, resultam em tempos diferentes para a realização destas etapas dos Vãos.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Introdução**

No capítulo em questão, se discorre, num primeiro momento, sobre o que se dispõe no ambiente da logística sobre os conceitos e definições referentes ao termo “dimensionamento de frota” .

A partir desta conceituação inicial, são apresentados alguns modelos de dimensionamento de frota, existentes na literatura científica , que embora não esgotem tudo que se tem disponível, representam pelas suas premissas e aplicabilidade bem características, uma amostra bastante significativa das variedades de modelos disponíveis.

Por fim, é feita a seleção do modelo a se utilizar para o problema de dimensionamento da frota de helicópteros para atendimento à demanda de transporte de pessoas das atividades de exploração e produção de uma bacia petrolífera, bem como as justificativas desta escolha.

#### **3.2 Dimensionamento de Frota**

O planejamento da Frota é um processo de gerenciamento complexo que visa o ajuste do dimensionamento de uma frota que seja adequada ao atendimento a uma determinada demanda a um custo efetivo.

A análise do dimensionamento de frota muitas vezes envolve decisões sobre conflitos de interesse (*trade-offs* ) de curto e longo prazo, devendo estar, portanto, alinhado à política e estratégia estabelecida pela companhia.

Apesar dos problemas de localização de centros de distribuição e roteamento de veículos já terem sido amplamente discutidos na literatura, o problema de otimização do

dimensionamento de frotas tem recebido, relativamente, pouca atenção, apesar dos custos dos veículos representarem parcela significativa dos custos de distribuição.

Desde o trabalho original de Kirby (1959) e Wyatt (1961), o problema de dimensionamento de frota tem sido analisado sob diferentes pontos de vista. Diversos modelos foram propostos baseados em diferentes premissas, tais como:

- i) Quanto à composição da frota : homogênea ou heterogênea
- ii) Quanto à demanda : a) determinística ou estocástica
  - b) estacionária ou não estacionária
- iii) Quanto à contratação *spot*<sup>5</sup> para picos de demanda: permitida ou não permitida

Os estudos que aparecem na literatura que tratam de dimensionamento de frota de veículos podem ser classificados em dois tipos:

- (1) Onde os tipos de veículos a serem operados são dados e a decisão a ser tomada se relaciona ao número de veículos de cada tipo a ser operado. ( Problemas de quantificação de frota – *fleet sizing* )
- (2) Onde as decisões se relacionam tanto aos tipos de veículos a operar quanto ao número de cada tipo. ( Problemas de composição de frota – *fleet composition* )

Os problemas do primeiro tipo tem recebido mais atenção na literatura que os problemas do tipo (2), os quais têm sido relativamente pouco tratados .

A seguir são apresentados alguns modelos de dimensionamento que retratam esta diversidade de premissas e aplicabilidade.

---

<sup>5</sup> contratação *spot* – contratação de curto prazo

### 3.3 Alguns Modelos Existentes

Neste tópico serão apresentados, em ordem cronológica, alguns trabalhos de dimensionamento de frotas, que representam a evolução destes modelos, possuindo características, no que se refere às premissas e aplicabilidades, específicas de cada um dos mesmos, que são peculiares e representativas do que se dispõe atualmente na literatura sobre o assunto.

#### 3.3.1 Modelo de David Kirby (1959)

Trata-se do primeiro trabalho publicado a tratar do problema de otimização do dimensionamento de uma frota. O trabalho de Kirby (1959) propõe a seguinte reflexão : “Sua frota é do tamanho certo?”

Este problema surgiu durante um estudo de um pequeno sistema ferroviário, onde uma das questões a serem respondidas era: “A frota de vagões é do tamanho certo?”

Se a frota fosse muito grande, a utilização do vagão seria baixa e se a frota fosse muito pequena, seria necessário o aluguel de vagões com custos extras.

Com esta percepção, se investiu contra a baixa utilização de vagões próprios do sistema ferroviário em questão, ao mesmo tempo que se buscou reduzir a frequência de contratações *spot* de vagões extras com custos adicionais.

Considerando-se que o custo diário do vagão alugado fosse igual a  $K$  vezes o custo diário do vagão próprio, e conhecendo-se a distribuição de probabilidades do número de vagões necessários em cada dia, obteve-se uma expressão para o custo total esperado por dia, possibilitando a identificação do número de vagões próprios ( $n$ ) e alugados ( $x - n$ ) que minimizassem o custo.

$$C = n + K \int_n^{\infty} (x - n) p(x) dx$$

onde :

- C = Custo
- n = n<sup>o</sup> vagões próprios
- x = n<sup>o</sup> vagões necessários por dia
- p(x) = probabilidade de ocorrência da necessidade de x vagões por dia

Para o mínimo custo C:

$$\frac{dC}{dn} = 0$$

$$1 - k(n - n) p(n) - k \int_n^{\infty} p(x) dx = 0$$

$$\int_n^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{k}$$

A regra simples e intuitiva concluída por Kirby (1959) para avaliar se a frota é do tamanho certo, é a de que : “ Se os vagões alugados são K vezes mais caros que os vagões próprios, então os vagões devem ser alugados, no máximo , 1 dia a cada k dias, por cada vagão próprio existente na frota.”

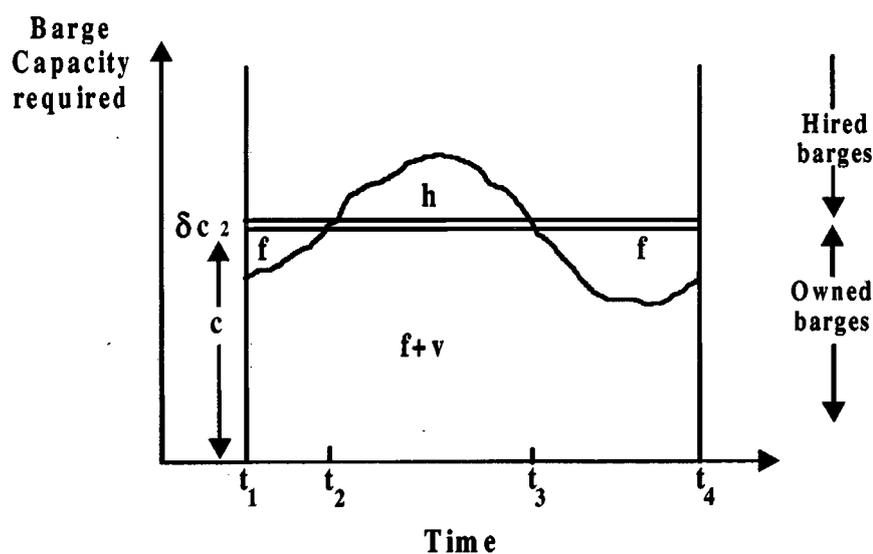
### 3.3.2 Modelo de J. K. Wyatt (1961)

Este trabalho pode ser considerado como uma extensão do trabalho de Kirby (1959) , por acrescentar à análise anterior a consideração dos custos variáveis da frota própria e alugada.

Consistiu na investigação do tamanho ótimo de uma frota própria de barcaças de uma companhia de petróleo, onde barcaças adicionais podiam ser alugadas. Da mesma forma que ocorreu com o trabalho de Kirby (1959), seus resultados apontaram para uma grande abrangência de aplicação.

Tratou a demanda por capacidade de transporte como uma função sazonal, com flutuações em um ciclo conforme mostrado na figura a seguir:

Figura 3.1: Perfil da demanda ao longo de um ciclo.



Fonte : J. K. Wyatt, *Optimal Fleet Size, Operational Research Quartely* 12, p. 186 (1961)

Onde as seguintes notações foram utilizadas:

- $c \Rightarrow$  Capacidade total das barcaças próprias;
- $f \Rightarrow$  Custo fixo diário por unidade de capacidade da barcaça própria;
- $v \Rightarrow$  Custo variável diário por unidade de capacidade da barcaça própria (aplicável somente quando a barcaça está em uso);
- $h \Rightarrow$  Custo diário por unidade de capacidade da barcaça alugada.

Sendo a capacidade necessária da frota própria tomada como uma variável contínua, ao se variar a capacidade da frota própria de um pequeno valor  $\delta c$ , provocaria uma alteração do custo de transporte dada por:

$$f(t_2 - t_1)\delta c - (h - f - v)(t_3 - t_2)\delta c + f(t_4 - t_3)\delta c.$$

Desta forma, a frota ótima (de mínimo custo) se daria quando a expressão acima fosse igual a zero.

Isto aconteceria quando :

$$\frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} = \frac{f}{h - v}$$

Esta proporção de tempo representa quantas barcaças deveriam ser alugadas ao longo do ciclo analisado, sendo igual a  $(f / (h - v))$ . O resultado de Kirby (1959) corresponde ao caso em que  $v = 0$ .

### 3.3.3 Modelo de J. Gould (1969)

Este estudo ampliou a abrangência dos estudos anteriores de Kirby (1959) e Wyatt (1961), pela abordagem de frotas heterogêneas quanto a capacidade de transporte (tipo e peso das cargas).

As aproximações de Kirby (1959) e Wyatt (1961) são de difícil utilização para tratamento de frotas heterogêneas. Por esta razão J. Gould desenvolveu um modelo em programação linear para este fim. Neste trabalho foi proposta a tabulação das frequências dos valores de demandas diárias, como forma de simplificação do modelo de programação linear.

Consistiu-se em um estudo de caso de uma companhia com consideráveis variações na demanda (de natureza sazonal) e 12 opções disponíveis de tipo de veículo. As viagens eram pendulares entre o centro de distribuição e cada cliente. Seu estudo mostrou que a companhia podia aumentar seu lucro alterando sua frota e, suas recomendações foram implementadas.

Este estudo foi feito em 1965, para o Departamento de Transporte de uma grande indústria. Os custos por ton. transportada, desta companhia, haviam sido maiores que de outras companhias. O estudo foi iniciado porque foi percebido que o custo alto poderia ser devido a frota própria excessivamente grande.

O Departamento de Transporte era responsável por todo transporte de líquidos, requerido pela companhia. Veículos eram contratados para qualquer dia em que os veículos próprios não fossem suficientes para os carregamentos necessários daquele dia. Os carregamentos eram conhecidos com 24 horas de antecedência .

### Sistema analisado

Demanda :

- materiais carregados ⇒ líquidos comestíveis  
⇒ líquidos não comestíveis
- Perfil ⇒ comportamento sazonal bem definido com grande volume de líquidos não comestíveis no inverno e pequeno volume no verão.

Veículos :

- Tipo ⇒ veículos com tanques de aço temperado  
⇒ veículos com tanques de aço inoxidável
- Capacidade ⇒ 14 t , 12 t, 10t, 8 t, 7 t e 5 t.

### Operação :

- Restrições técnicas ⇒ Tanques de aço inoxidável carregavam tanto líquidos comestíveis como não comestíveis.  
  
⇒ Tanques de aço temperado só carregavam líquidos não comestíveis.
- Durante períodos de baixa demanda, veículos podiam ser deslicenciados por um ou mais meses, e assim , parte do custo fixo era eliminada.

### Objetivo do estudo

- Quantos veículos de cada tipo e tamanho se deveria possuir, para que se tivesse o mínimo custo total de transporte ?

### Motivação para a análise

- Considerava-se praticamente não econômico possuir frota suficiente para picos de demanda, porque um número significativo de veículos ficaria ocioso na maior parte do ano. Da mesma forma, seria não econômico insistir que a frota própria fosse dimensionada de forma a garantir que cada veículo da companhia fosse plenamente utilizado ao longo do ano, pois esta medida levaria a custos excessivos de aluguel ao longo do período.

### Conclusões do estudo

- Este modelo representou bem a situação real, exceto em dois aspectos:  
⇒ Primeiramente, porque assumiu total conhecimento da demanda ao longo do tempo;

⇒ Em segundo, porque os veículos eram alocados a um determinado tipo de carga e tamanho de carregamento, numa base mensal de tempo. Isto se prestaria bem à alocação ao tipo de carga, mas não ao tamanho dos carregamentos, que mudavam diariamente.

### Recomendações resultantes

- Redução do tamanho da frota própria;
- Maior ênfase para grandes veículos;
- Maior ênfase para veículos com tanques de aço inoxidável.

A Companhia aceitou as recomendações e implantou substancialmente as mesmas.

### 3.3.4 Modelo de R. H. Mole (1975)

R.H. MOLE (1975) estende os trabalhos anteriores de Kirby (1959) e Wyatt (1961) no que se refere ao tratamento do conceito de que a frota ótima é dependente do tempo, já que a demanda, custo fixos e variáveis da frota própria e custos de aluguel de veículos normalmente variam ao longo do tempo. Em tal tratamento, Mole (1975) se utilizou da programação dinâmica para identificação das frotas ótimas específicas de cada período, desenvolvendo, assim, um modelo adequado ao planejamento das alterações de composição de frota ao longo do tempo, apoiando as decisões quanto ao momento ideal para o investimento em novos veículos, em resposta à presença de tendências de demanda, com flutuações sazonais.

Para aplicação do modelo desenvolvido por Mole (1975), é necessário se trabalhar com previsões (*forecasting*) de demanda e custos, para antecipação de efeitos de tendência e sazonalidade, que quanto mais precisas forem estas percepções, melhor será o planejamento da frota de veículos.

Apesar dos avanços introduzidos por Mole aos modelos de Kirby (1959) e Wyatt (1961), possui como fraquezas, também existentes naqueles modelos, a sua aplicação somente a frotas homogêneas (um único tipo de veículo) e o tratamento da demanda como proveniente de uma única entidade (cliente único).

Como já apresentado anteriormente, a primeira fraqueza citada foi tratada por Gould, em seu modelo de programação linear.

### 3.3.5 Modelo de Parikh (1977)

Diferentemente dos modelos apresentados anteriormente, Parikh (1977) inovou ao abordar o problema de Dimensionamento de frota, não como a investigação da frota ótima sob o ponto de vista do custo mínimo, mas sim sob o ponto de vista da frota necessária para se atender a um determinado nível mínimo de serviço, medido através do percentual máximo de atendimentos realizados com atraso.

Esta alteração no tipo de abordagem do problema, exigiu mudança também na forma de especificação da demanda, que até então era tratada de forma determinística, a partir de Parikh (1977) surge o primeiro modelo de dimensionamento de frota, que trata a demanda como um padrão estocástico.

O problema analisado por Parikh (1977) consistia em um caso real de uma companhia de transporte de abrangência nacional, constituída de, aproximadamente, 10.000 veículos de transporte, agrupados em aproximadamente 250 frotas atuando de maneira independente, atendendo, cada qual, um grupo específico de clientes. Os atendimentos a cada pedido eram feitos de forma exclusiva, alocando-se um veículo a cada pedido de cliente. No caso em que não havia veículo disponível para o atendimento quando do recebimento de algum pedido de cliente, coberto por uma das frotas estabelecidas, este atendimento incorria em atraso até o retorno de qualquer veículo específico desta frota à disponibilidade para um novo atendimento. O nível de serviço era

medido em termos da fração de pedidos de clientes atrasados em função da indisponibilidade eventual de veículos para o atendimento.

Esta nova forma de abordagem para o problema de dimensionamento de frota, reunia todas as condições favoráveis à aplicação da teoria de fila, pois se constituía em um sistema com multi-servidores (veículos de transporte) atendendo a uma fila de pedidos de transporte pelos clientes, demanda esta com valores de média e padrão de distribuição conhecidos tanto em relação à variável taxa de chegada (Frequências de pedidos), como em relação aos tempos de duração dos atendimentos. E, por maior razão, pela adoção do nível de serviço mínimo (% máximo de atendimentos com atraso) como parâmetro principal para identificação da frota ótima.

Como padrão da distribuição da variável taxa de chegada se utilizou Poisson e para o tempo de atendimento, o padrão de distribuição da família K – Erlang com parâmetro de forma K entre 6 e 12.

Ressalta-se como grande novidade introduzida pelo modelo, a sua aplicabilidade a problemas com múltiplos clientes (como o caso tratado nesta dissertação).

Da mesma forma que o modelo de Gould (1969), o modelo de Parikh (1977) permite sua aplicação a problemas envolvendo frota heterogênea.

Restringe-se sua utilização apenas em situações que se admita a possibilidade de alugar veículos por dado período.

### 3.3.6 Modelo de Etezadi e Beasley ( 1983 )

O trabalho de Etezadi e Beasley (1983) se aplica a processos de distribuição física com um centro de distribuição único atendendo a diversos clientes, tanto para sistemas de viagens pendulares ( atendimento a um único cliente por viagem , com origem e destino no CD), assim como para viagens de atendimento múltiplo ( atendimento à diversos clientes, com origem e destino no CD ).

O modelo é representado como um problema de programação linear mista (com variáveis inteiras e variáveis reais), constituindo-se, seu algoritmo, de um sistema linear de equações e inequações, composto da função objetivo, equação sobre a qual se busca um valor ótimo ( máximo, mínimo, ou um valor específico), e das demais equações e inequações lineares que representam as restrições do problema.

Através de simulação o modelo testa a capacidade de atendimento de diversas alternativas de frota, sem testar exaustivamente as alternativas de roteiro possíveis, mas contudo, assumindo as duas categorias de roteiros possíveis (viagens de atendimento único e viagens de atendimento múltiplo), para as quais se estabelecem critério de determinação das distâncias a percorrer . Esta forma de tratamento confere ao modelo grande agilidade e facilidade de aplicação, pela simplicidade de seu algoritmo. A expectativa em relação ao seu resultado é de que seja uma boa aproximação do que se espera ser a frota ótima. Estas características capacitam este modelo como uma adequada ferramenta de dimensionamento de frota para utilização na fase de planejamento, como suporte a tomada de decisões de médio e longo prazo, tanto para problemas de quantificação de frota , como para problemas de composição de frota . Devendo-se utilizar posteriormente, a partir do seu resultado, algoritmos mais robustos de simulação com roteamento (com avaliação exaustiva de roteiros possíveis) , economizando assim, tempo e capacidade de processamento.

Portanto o modelo não se aplica como suporte a decisões sobre questões de curto prazo, tais como a avaliação do melhor veículo para atendimento a um determinado cliente ou o melhor roteiro em um determinado dia, mas sim como suporte a decisões de longo prazo , como a avaliação do número e tipo dos veículos a serem operados em um dado sistema de distribuição física.

A seguir são apresentadas as variáveis consideradas, bem como o algoritmo desenvolvido :

#### parâmetros de entrada

$c_i$  Distância entre o Centro de Distribuição (C.D.) e o cliente  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

$q_{it}$  Demanda a ser atendida ao cliente  $i$  no período  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ).

$d_{it}$  Distância equivalente ao tempo de entrega ao cliente  $i$  no período  $t$  ( Expressa a distância que o veículo poderia percorrer durante o tempo despendido na entrega ao cliente  $i$  no período  $t$ ).

$D_j$  Máxima distância a ser percorrida em um período pelo veículo tipo  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ).

$Q_j$  Máxima capacidade de transporte do veículo tipo  $j$ .

$F_j$  Custo fixo do veículo próprio do tipo  $j$  para  $T$  períodos.

$f_j$  Custo fixo do veículo alugado do tipo  $j$  para um período.

$V_j$  Custo variável (por distância percorrida) do veículo próprio do tipo  $j$ .

$v_j$  Custo variável (por distância percorrida) do veículo alugado do tipo  $j$ .

$e_t$  Distância esperada a ser percorrida (excluídas as distâncias equivalentes -  $d_{it}$  ) no período  $t$ .

#### variáveis de resposta

$x_j$  Número de veículos próprios do tipo  $j$ .

$y_{jt}$  Número de veículos alugados do tipo  $j$  no período  $t$ .

$u_{jt}$  Número de veículos próprios do tipo  $j$  que são utilizados no atendimento no período  $t$ .

$z_{jt}$  Distância percorrida (excluídas as distâncias equivalentes -  $d_{it}$  ) pelos veículos próprios do tipo  $j$  no período  $t$ .

$w_{jt}$  Distância percorrida (excluídas as distâncias equivalentes -  $d_{it}$  ) pelos veículos alugados do tipo  $j$  no período  $t$ .

### Função Objetivo

$$\min \sum_{j=1}^m (F_j x_j + \sum_{t=1}^T f_j y_{jt}) + \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T (V_j z_{jt} + v_j w_{jt})$$

Identifica a alternativa possível de mínimo custo.

### Restrições

$$u_{jt} \leq x_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que o número de veículos próprios usados em qualquer período não excede o número total de veículos próprios.

$$z_{jt} \leq u_{jt} D_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

$$w_{jt} \leq y_{jt} D_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

Garantem que as distâncias percorridas pelos veículos próprios e alugados, respectivamente, não ultrapassem suas distâncias máximas por período.

$$\sum_{j=1}^m (z_{jt} + w_{jt}) = e_t, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que a distância total percorrida seja igual à distância total esperada.

$$\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt}) D_j \geq e_t + \sum_{i=1}^n d_{it}, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que as composições de veículos a serem testadas sejam capazes de percorrer a distância total demandada por todos os clientes em cada um dos períodos.

$$\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt})Q_j \geq \sum_{i=1}^n q_{it}, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que as composições de veículos a serem testadas tenham capacidade suficiente para transportar a quantidade total demandada por todos os clientes em cada um dos períodos.

$$w_{jt}, z_{jt} \geq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

$$x_j, y_{jt}, u_{jt} \text{ inteiros}, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

### Viagens de atendimento único

$$e_t = 2 \sum_{i=1}^n c_i \quad t = 1, \dots, T$$

### Viagens de atendimento múltiplo

$$e_t = 2c \sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt}) + d [n - \sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt})], \quad t = 1, \dots, T$$

$\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt})$  é o número de viagens assumindo que cada veículo só faz uma viagem por período.

c - distância média entre o primeiro e o último cliente ao CD.

d - distância média entre clientes.

### 3.4 Seleção do Modelo

O propósito deste trabalho é desenvolver um modelo de dimensionamento de frota que sirva para apoiar decisão na fase de planejamento dos recursos de transporte, e o objetivo maior do modelo é a identificação dos tipos de veículos a utilizar, bem como suas respectivas quantidades. Não faz parte deste estudo a investigação dos melhores roteiros, necessidade esta da maior relevância, porém característica de uma fase posterior de operacionalização do sistema, quando se possui um conhecimento mais preciso da demanda, e a partir de uma frota já estabelecida se elabora a programação das viagens.

Alguns estudos buscam integrar os objetivos específicos das fases de planejamento e de operacionalização, contudo, acabam se tornando extremamente complexos e de difícil utilização, demandando elevado tempo de processamento computacional.

Os modelos anteriormente apresentados, foram elencados como exemplos de estudos voltados prioritariamente aos objetivos de planejamento de frota, caracterizando-se alguns como modelos de quantificação de frota, e outros como modelos de composição de frota. Caracterizam-se, portanto, pela simplicidade em suas concepções e aplicações, o que confere maior agilidade e versatilidade às análises de cenários, necessidade fundamental para o processo de planejamento.

A seguir são apontadas as principais diferenças dos modelos aqui apresentados, tanto quanto às suas abrangências de aplicação, quanto às formas de tratamento da demanda e da frota, bem como quanto à metodologia matemática utilizada.

Quanto à forma de abordar a demanda, pode ser identificada como determinística ou estocástica, e, ainda, alguns a tratam como se fosse uma só entidade (cliente único), enquanto outros reconhecem-na em sua diversidade (clientes múltiplos).

Quanto a forma de tratamento da frota, distinguem-se por admitirem ou não mais de um tipo de veículo, por permitirem ou não o uso de frota alugada além da frota própria, e por considerarem ou não os custos variáveis das frotas fixas e próprias.

Quanto aos métodos matemáticos utilizados, surgem como alternativas de modelos: as fórmulas algébricas, os sistemas de programação linear e os sistemas de programação dinâmica. E como alternativas de algoritmo de solução : a otimização, a simulação , a heurística e a aproximação matemática.

A tabela 3.1 da página seguinte reúne as principais características dos modelos apresentados neste trabalho, que indicam o modelo de Etezadi e Beasley (1983) como o mais abrangente no tratamento da frota e da demanda, mesmo a demanda sendo tratada de forma determinística, o que não se revela em grande prejuízo para aplicação ao problema aqui abordado.

O modelo de Etezadi e Beasley (1983) possibilita, mesmo que de forma aproximada, a alocação de tipos de roteiros (viagens de atendimento único ou viagens de atendimento múltiplo) ao sistema analisado o que confere maior garantia aos seus resultados.

Mesmo não possuindo embutido no seu método, a análise de tendências e sazonalidades (*forecasting*), como é constituído o modelo de Mole (1975), é perfeitamente possível e simples obter resultados de simulações de demandas com presenças de tendências e sazonalidades.

Sua maior deficiência é não tratar adequadamente o nível de serviço associado às diversas alternativas de composição de frota, o que não só é possível no modelo de Parikh (1977), como se constituiu em seu próprio objetivo.

Tabela 3.1 – Características dos modelos de dimensionamento de frota apresentados.

MODELOS	DIMENSIONAMENTO	FROTA	DEMANDA	MÉTODO	ALGORITMO
Kirby (1959)	Quantificação	Homogênea Própria ou Alugada Custos fixos	Determinística Cliente Único	Fórmula Algébrica	Otimização s/ alocação de roteiros
Wyatt (1961)	Quantificação	Homogênea Própria ou Alugada Custos fixos e variáveis	Determinística Cliente Único	Fórmula Algébrica	Otimização s/ alocação de roteiros
Gould (1969)	Composição	Heterogênea Própria ou Alugada Custos fixos e variáveis	Determinística Cliente Único	Programação Linear	Otimização s/ alocação de roteiros
Mole (1975)	Quantificação	Homogênea Própria ou Alugada Custos fixos e variáveis	Determinística Cliente Único	Programação Dinâmica	Otimização s/ alocação de roteiros
Parikh (1977)	Composição	Heterogênea Própria Custos fixos e variáveis	Estocástica Múltiplos Clientes	Teoria de Fila	Aproxim. Matemática c/ alocação de roteiros
Etezadi e Beasley (1983)	Composição	Heterogênea Própria ou Alugada Custos fixos e variáveis	Determinística Múltiplos Clientes	Programação Linear	Simulação c/ alocação de roteiros

Fonte: Tabela desenvolvida especialmente para a dissertação

Concluída a análise conceitual das vantagens do modelo de Etezadi e Beasley (1983) comparativamente aos demais modelos apresentados, resta verificar a sua adequação do ponto de vista prático, avaliação esta que é conduzida ao longo do capítulo seguinte, através de um estudo de caso sobre o qual é aplicado o modelo selecionado.

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Introdução

Ao longo deste capítulo é feita a ilustração do problema com o estudo de caso das operações de transporte de passageiros, por via aérea, da PETROBRAS na Bacia de Campos.

São apresentadas inicialmente as características e peculiaridades próprias deste sistema logístico.

Em seguida, são identificadas as adaptações necessárias a introduzir no modelo original de Etezadi e Beasley (1983) de forma a possibilitar a aplicação do mesmo sobre o caso em questão, e a partir daí apresentar as hipóteses simplificadoras e os dados do problema.

Prosseguindo é feita uma breve descrição do programa utilizado para modelar o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983), e ao final são apresentados os resultados desta simulação.

Como na PETROBRAS, seu negócio, *core business*, não é transportar, e sim “Atuar de forma rentável nas atividades da indústria de óleo e gás, e nos negócios relacionados, nos mercados nacional e internacional, fornecendo produtos e serviços de qualidade, respeitando o meio ambiente, considerando os interesses dos seus acionistas, e contribuindo para o desenvolvimento do país.”, o seu objetivo em relação ao dimensionamento de sua frota de transporte é buscar o mínimo custo, ao invés da maximização do lucro, lembrando que, desde que garantido o atendimento total da demanda de transporte de passageiros por via aérea, premissa esta sobre a qual se fundamenta todo o desenvolvimento deste estudo de caso.

### 4.2 Caso Logístico

Assim como em outras bacias petrolíferas offshore, a distribuição física de pessoas na Bacia de Campos, se desenvolve com a utilização de dois modais de transporte: o marítimo e o aéreo. Entretanto, restringe-se a abordagem deste estudo apenas à parcela de distribuição física de pessoas que se desenvolve por via aérea.

O transporte aéreo de passageiros para atendimento às operações da PETROBRAS, na Bacia de Campos, movimenta atualmente em média 35.000 passageiros por mês, com perspectiva de atingir 40.000 até o final de 2001, compreendendo o atendimento a um número aproximado de 100 unidades marítimas (entre plataformas fixas, móveis e navios), apoiadas a partir do aeroporto público de Macaé, RJ (administrado pela INFRAERO), que movimenta em média 18.000 passageiros por mês, e a partir do heliporto privado de São Tomé em Campos, RJ, de propriedade da PETROBRAS, que movimenta em média 17.000 passageiros por mês.

Para estas operações, dispõe-se de uma frota atual de 03 helicópteros de grande porte e 25 de médio porte (não se dispõe atualmente na frota de helicópteros de pequeno porte), estando dimensionados em São Tomé 02 helicópteros de grande porte e 06 de médio porte, e o restante da frota dimensionada para Macaé. A classificação destas aeronaves em relação ao porte se dá em função das suas capacidades individuais de transporte de passageiros, e está associada a valores de custos médios distintos para a parcela de custo fixo mensal e para a parcela variável, por hora voada.

A quantidade total de passageiros transportados inclui os vôos de embarque e desembarque das Unidades Marítimas e os vôos de transferência de passageiros entre estas unidades (chamados de vôos de Transbordo). O menor quantitativo de frota sediada em São Tomé, mesmo que responsável pelo atendimento a uma quantidade de passageiros equivalente à transportada por Macaé, explica-se pelas menores distâncias

daquele centro de distribuição às unidades marítimas, e por reservar-se àquela instalação somente vôos de embarque e desembarque de troca de turma, parcela esta da demanda de perfil bem regular, e que se caracteriza por missões de ida e volta a uma única unidade marítima por vez. Estas programações caracterizam-se pelo melhor aproveitamento das capacidades de transporte dos helicópteros, quando comparadas às missões de atendimento a várias unidades marítimas em uma única viagem, como acontece em Macaé, responsável pelo atendimento à parcela da demanda de perfil irregular associada ao que se convencionou chamar de passageiros eventuais.

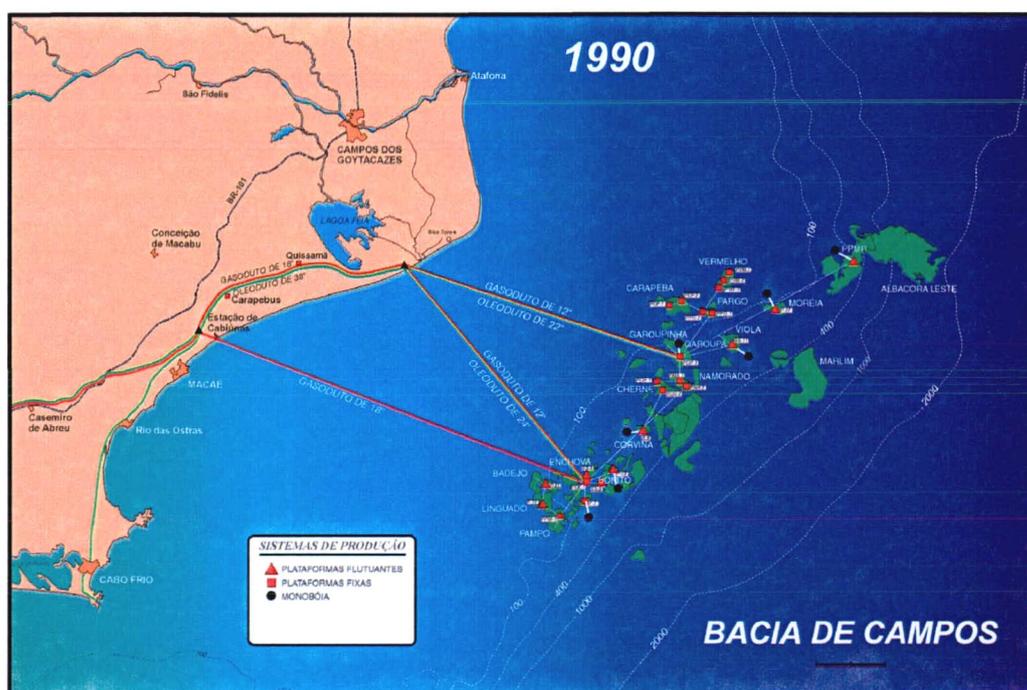
Embora não seja o foco desta dissertação tratar da distribuição física de pessoas por via marítima, cabe esclarecer que o sistema integral de distribuição física de passageiros na Bacia de Campos também conta com a participação do transporte marítimo, responsável pela movimentação de uma parcela adicional de aproximadamente 5.000 passageiros por mês, através da utilização de uma lancha de passageiros do tipo SWATH<sup>6</sup>. O conceito SWATH constitui-se em tecnologia muito recente, que caracteriza-se pelos seus dois cascos submersos, semelhantes aos "submarinos" de uma plataforma semi-submersível que, ao responderem por 80% do deslocamento da embarcação, reduzem brutalmente a ação da água do mar ao casco a elas ligado por meio de duas colunas de sustentação com pequena "área de linha d'água". A redução na "área de linha d'água" redundando na obtenção de melhores índices de conforto, independentemente das condições ambientais ora existentes, apresentando desempenho excepcionalmente superior aos das embarcações convencionais (monocasco) e catamarãs (casco duplo). A experiência de um ano de operação com este tipo de embarcação vem demonstrando ser este equipamento bastante apropriado às condições adversas de mar e vento existentes na região da Bacia de Campos.

---

<sup>6</sup> SWATH (SMALL WATERPLANE AREA TWIN HULL) – Casco Duplo e Pequena Área de Linha D'água.

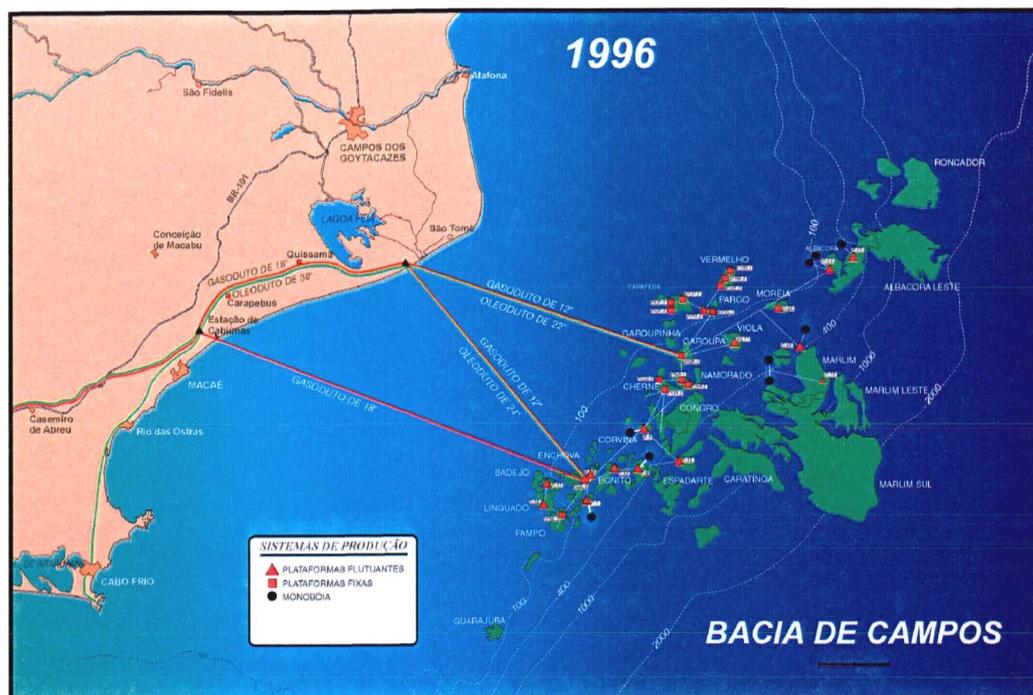
O desenvolvimento das atividades *offshore* de exploração e produção da PETROBRAS na Bacia de Campos vem expandindo progressivamente a sua área de atuação, predominantemente, em direção ao norte da bacia, razão pela qual se viabilizou economicamente e tecnicamente, em 1997, o empreendimento da PETROBRAS de construção do heliporto de São Tomé em Campos, RJ, de sua propriedade. Os dois quadros seguintes ilustram a ampliação destas atividades na Bacia de Campos ao longo do tempo :

Figura 4.1 : Mapa dos campos de petróleo descobertos pela PETROBRAS na Bacia de Campos até 1990.



Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS – E&P-BC

Figura 4.2 : Mapa dos campos de petróleo descobertos pela PETROBRAS na Bacia de Campos até 1996.



Fonte : Banco de imagens da PETROBRAS – E&P-BC

As unidades marítimas possuem características de demandas diferenciadas quanto às quantidades, distâncias em relação aos dois centros de distribuição utilizados e algumas vezes pelas limitações de alguns helipontos para operação com determinados modelos de aeronaves.

A seguir são detalhadas as características e peculiaridades próprias dos componentes logísticos, da operação e do dimensionamento do sistema logístico selecionado para o estudo de caso:

### 4.2.1 Aeródromos

Conforme já apresentado em 2.2.1, é muito comum, em diversos ramos de atividades, a utilização de aeródromos como centros de distribuição física de pessoas e cargas, não sendo diferente nas operações *offshore* da PETROBRAS na Bacia de Campos.

Embora estas operações de transporte de passageiros na Bacia de Campos envolvam a utilização do aeroporto de Macaé e do heliporto de São Tomé, como centros de distribuição física para as unidades marítimas atendidas. Optou-se por abordar-se neste estudo de caso, somente a parcela de demanda coberta pela operação do heliporto de São Tomé, reduzindo-se assim aproximadamente à metade do quantitativo total da demanda. Esta abordagem traz embutida consigo uma outra simplificação que se refere ao tipo de viagem característico de atendimento a esta parcela da demanda, quando comparada àquela referente ao atendimento feito através do aeroporto de Macaé, haja vista os atendimentos feitos através do heliporto de São Tomé distinguirem-se por compreenderem apenas viagens de atendimento a uma única unidade marítima por vez, enquanto os atendimentos por Macaé caracterizam-se pela visita a múltiplos clientes em uma única viagem.

O aeroporto de Macaé classifica-se como público, enquanto o heliporto de São Tomé opera como instalação privada de uso exclusivo da PETROBRAS.

O aeroporto de Macaé é homologado para operação IFR, enquanto o heliporto de São Tomé ainda opera somente em VFR, estando em vias de obter a homologação IFR.

O aeroporto de Macaé possui pista de 1200 metros, o que lhe permite operar com aviões, e possui capacidade atualmente para acomodar até 30 helicópteros sediados naquela base aérea. O quadro a seguir apresenta fotografia aérea desta instalação.

Figura 4.3 : Fotografia aérea do Aeroporto de Macaé, RJ.



Fonte : Banco de imagens da PETROBRAS – E&P-BC

O heliporto de São Tomé , por não possuir pista, não tem condições de receber aviões, entretanto possui atualmente capacidade para operar com até 08 helicópteros. O quadro a seguir apresenta fotografia aérea de suas instalações.

Figura 4.4 : Fotografia aérea do Heliporto de São Tomé em Campos, RJ.



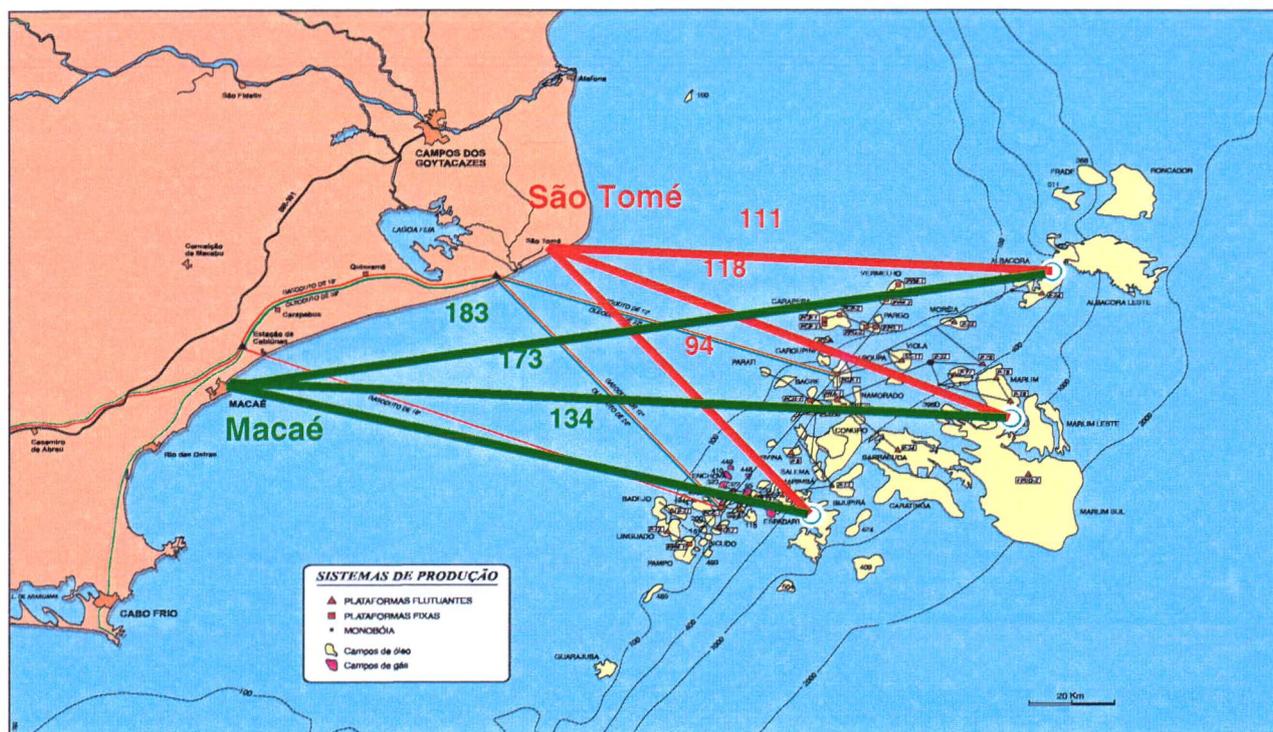
Fonte : Banco de imagens da PETROBRAS – E&P-BC

## 4.2.2 – Unidades marítimas

Hoje na Bacia de Campos se encontram em torno de 100 unidades marítimas, sendo aproximadamente 25 plataformas fixas, 50 plataformas móveis ( atualmente não tem sido utilizadas plataformas auto-eleváveis, por não estar havendo exploração em lâminas d'água rasas nesta região) e 25 navios.

Estas unidades marítimas estão situadas a distâncias que variam de 110 km a 220 km, quando relativas ao aeroporto de Macaé e de 70 km a 160 km quando tomadas a partir do heliporto de São Tomé. O quadro a seguir ilustra bem esta configuração:

Figura 4.5: Mapa de localização do aeroporto de Macaé e do heliporto de São Tomé.



Fonte : Banco de imagens da PETROBRAS – E&P-BC.

As demandas de passageiros de cada unidade compreendem, fundamentalmente, duas parcelas de perfis bem distintos e característicos:

- Uma parcela bem regular considerada de comportamento determinístico , com quantidades e freqüências preestabelecidas e constantes, associadas ao que se denomina troca de turma( pessoal lotado nas unidades marítimas, que alterna períodos de 14 dias de confinamento em alto mar por 21 ou 14 dias de folga em terra).
- Outra parcela, irregular, considerada de comportamento estocástico, com quantidades e freqüências variáveis, sob o ponto de vista da demanda, associada ao que se define como passageiro eventual ( pessoal não lotado nas unidades marítimas e portanto não vinculado às suas operações de rotina, e que embarcam para acompanhamento, fiscalização, inspeção, manutenção e execução de operações específicas e especializadas ).
- Muito embora, estas duas parcelas de demanda sejam geradas de forma espontânea e muitas vezes imprevisível, os seus perfis originais são ajustados pelos responsáveis da área de programação de transportes, através da distribuição uniforme da demanda diária ao longo das semanas, após negociação com as unidades marítimas sobre o estabelecimento de dias fixos na semana para atendimento às mesmas, levando-se em conta a capacidade de atendimento dos recursos contratados (helicópteros). O que se faz assim é transformar uma demanda de perfil eminentemente estocástico em sua geração, em uma demanda de perfil aproximadamente determinístico, para o seu efetivo atendimento.

Conforme já mencionado em 4.2, estes dois grupos característicos da demanda se equivalem em quantitativos envolvidos, na Bacia de Campos.

Por fim, cabe citar que, embora se constituam de pouquíssimos casos, algumas unidades marítimas em operação na Bacia de Campos possuem restrição para operação com alguns modelos de grande porte, por limitação de seus helipontos quanto às suas capacidades máximas relativas à resistência estrutural e dimensões máximas.

#### 4.2.3 – Helicópteros

Com o objetivo de especificação de qualificação de pilotos, a PETROBRAS classifica os helicópteros em relação ao seu porte em grande, médio e pequeno, de acordo com suas capacidades máximas de assentos, como a seguir :

- Pequeno Porte : Capacidade máxima de assentos de 10 passageiros (excluída a tripulação)
- Médio Porte : Capacidade máxima de assentos entre 11 e 15 passageiros (excluída a tripulação)
- Grande Porte : Capacidade máxima de assentos superior a 15 passageiros (excluída a tripulação)

Alerta-se que os valores acima são máximos e que a depender das distâncias de suas missões e conseqüentemente do volume de combustível necessário, estas capacidades poderão sofrer redução.

Diferenciam-se também os diversos modelos de helicópteros pelas suas velocidades de cruzeiro, que associadas às suas capacidades de transporte e suas autonomias (sejam dadas por distância, tempo ou volume de combustível) se constituem nos fatores de desempenho operacional determinantes e interdependentes.

Vale ressaltar, como poderá ser observado ao longo do texto até 4.2.4, que o melhor desempenho em termos de porte, velocidade e autonomia característicos dos

modelos S-61 e o S-76A, associado ao seus maiores custos de afretamento, conferem melhores relações custo/benefício à medida que estas aeronaves são utilizadas com maiores taxas de ocupação. Considerando que a demanda alocada para São Tomé corresponde preponderantemente à parcela chamada regular em 4.2.2, a operação por aquela base reúne todas as condições favoráveis à sua otimização com o uso dos helicópteros S-61 e o S-76A.

Todos helicópteros contratados pela PETROBRAS são homologados para vôo IFR, podendo voar VFR a depender do tipo de homologação do aeródromo com o qual se está operando.

Nas páginas seguintes são apresentados os modelos dos helicópteros atualmente contratados pela PETROBRAS para suas operações na Bacia de Campos onde constam as descrições de suas principais características e suas respectivas fotos ilustrativas.

#### 4.2.3.1 Modelo Sikorsky 61N ( S-61N )

Este modelo lançado desde 1968, vem sendo atualmente utilizado nas operações da PETROBRAS, na Bacia de Campos, principalmente em trocas de turma de unidades marítimas e no transporte de grandes comitivas ( Grupos de pessoas convidadas pela PETROBRAS a conhecer suas atividades em alto mar ).

Por sua capacidade de pouso na água ( possui flutuadores laterais externos ), é o tipo de aeronave prioritariamente destacado em missões de salvamento *offshore* .

Atualmente está dimensionado um S-61 em Macaé , para atendimento a comitivas, e outros dois S-61 em são Tomé, para atendimento a trocas de turma.

Figura 4.6: Fotografia de helicóptero do modelo S – 61.



---

#### ESPECIFICAÇÃO BÁSICA

COMPRIMENTO COM AMBOS OS ROTORES GIRANDO: 20,20m  
VELOCIDADE DE CRUZEIRO: 110 KNOTS  
Nº DE ASSENTOS DE PASSAGEIROS: 26  
PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM: 20.000 lb  
Nº DE TURBINAS: 02

---

Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

#### 4.2.3.2 Modelo Sikorsky 76A ( S-76A )

Lançado em 1979, este modelo vem sendo aplicado na Bacia de Campos tanto no atendimento à parcela de demanda regular ( trocas de turma ), como no atendimento à parcela de demanda irregular ( passageiros eventuais e de transbordo – transporte de pessoas entre unidades marítimas ).

Pela sua maior velocidade, e pelo seu porte permitir, é o modelo utilizado pela PETROBRAS no resgate aeromédico offshore.

Por estas razões é indistintamente aplicado em Macaé como em São Tomé e junto com o S – 61 compõem integralmente a frota de helicópteros de São Tomé.

Figura 4.7: Fotografia de helicóptero do modelo S – 76A



---

#### **ESPECIFICAÇÃO BÁSICA**

COMPRIMENTO COM AMBOS OS ROTORES GIRANDO: 16,00 m

VELOCIDADE DE CRUZEIRO: 128 kt

Nº DE ASSENTOS DE PASSAGEIROS: 12

PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM: 10.500 lb

Nº DE TURBINAS: 2

---

Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

#### 4.2.3.3 Modelo Eurocopter SA-330J ( PUMA )

Foi lançado em 1974, e vem sendo aplicado pela PETROBRAS, mais freqüentemente, em apoio às atividades de exploração e produção de petróleo na selva, pela sua grande capacidade de transporte externo de cargas (a carga é transportada pendurada externamente, suportada por guincho da aeronave), correspondente a 2.800kg, capacidade esta, equivalente a do helicóptero S-61, apesar de possuir menor porte.

Este modelo de aeronave , sempre que está compondo a frota da Bacia de Campos, é utilizado preferencialmente no transporte de cargas ou em troca de turmas.

Figura 4.8: Fotografia de helicóptero do modelo AS – 330J (PUMA).



---

#### **ESPECIFICAÇÃO BÁSICA**

COMPRIMENTO COM AMBOS OS ROTORES GIRANDO: 18,15 m

VELOCIDADE DE CRUZEIRO: 126 kt

Nº DE ASSENTOS DE PASSAGEIROS: 17

PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM: 16.315 lb

Nº DE TURBINAS: 2

---

Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

#### 4.2.3.4 Modelo BELL 412 SP ( B-412 )

Mesmo tendo surgido no mercado em 1984, já a alguns anos vem sendo gradativamente substituído por aeronaves do modelo S-76A, em função da sua menor capacidade de transporte de passageiros, já que, embora seu peso de decolagem máximo seja próximo do S-76A , possui maior peso próprio e maior consumo de combustível. Atualmente são utilizados apenas em Macaé, para atendimento a passageiros eventuais para unidades marítimas mais próximas.

Figura 4.9: Fotografia de helicóptero do modelo B – 412.



---

#### **ESPECIFICAÇÃO BÁSICA**

COMPRIMENTO COM AMBOS OS ROTORES GIRANDO: 17,13 m

VELOCIDADE DE CRUZEIRO: 120 kt

Nº DE ASSENTOS DE PASSAGEIROS: 13

PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM: 11.900 lb

Nº DE TURBINAS: 2

---

Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

#### 4.2.3.5 Modelo BELL 212 ( B-212 )

Existe desde 1971, e vem sendo utilizado na Bacia de Campos de forma restrita, somente para o transporte interno de cargas.

Figura 4.10: Fotografia de helicóptero do modelo B – 212.



---

#### **ESPECIFICAÇÃO BÁSICA**

COMPRIMENTO COM AMBOS OS ROTORES GIRANDO: 17,46 m

VELOCIDADE DE CRUZEIRO: 100 kt

Nº DE ASSENTOS DE PASSAGEIROS: 13

PESO MÁXIMO DE DECOLAGEM: 11.200 lb

Nº DE TURBINAS: 2

---

Fonte: Banco de imagens da PETROBRAS.

#### 4.2.3.6 Custos de Afretamento

Fazendo o contraponto aos fatores de desempenho operacional, estão os fatores econômicos de custo de afretamento, com suas parcelas de custo fixo mensal e de custo por hora de voo, que no caso dos helicópteros em operação em São Tomé, possuem valores médios atuais, conforme ordem de grandeza demonstrada no quadro abaixo:

Tabela 4.1 – Taxas de afretamento de helicópteros em operação em São Tomé.

		CUSTO FIXO MENSAL (R\$)	CUSTO DA HORA VOADA (R\$)
GRANDE PORTE	S-61	285.000,00	1.750,00
MÉDIO PORTE	S-76A	135.000,00	1.520,00

Fonte: Contratos da PETROBRAS em vigor em 2000.

#### 4.2.4 – Operação

Assim como já citado em 2.3, as operações aéreas desenvolvidas tanto a partir do aeroporto de Macaé, RJ, como também a partir do heliporto de São Tomé, Campos, RJ, estão limitadas a, no máximo, 9 horas diárias de exposição a luz do dia, em média no ano.

Este período diário máximo, de fato, restringe as operações de voo da PETROBRAS na Bacia de Campos a 6 horas diárias efetivas de voo, reservando-se as 3 horas restantes a inspeções e manutenções de rotina, bem como ao planejamento dos vôos e para execução dos procedimentos de embarque e desembarque de passageiros em terra.

Quanto às regras de voo, os dois aeródromos utilizados diferenciam-se por Macaé operar em procedimento IFR enquanto São Tomé opera por procedimento VFR.

Como a abordagem deste capítulo focaliza as operações desenvolvidas a partir do heliporto de São Tomé, os cálculos de autonomia, capacidade de transporte e velocidade média dos vôos ,para os modelos de aeronaves utilizados, são feitos sob as premissas das regras de vôo visual ( VFR).

Os valores práticos operacionais resultantes da aplicação das premissas do VFR para os dois modelos de helicópteros utilizados em São Tomé são os mostrados a seguir:

Tabela 4.2: Dados operacionais das aeronaves em atuação em São Tomé.

		Autonomia em distância (Km)	Velocidade Média (km/h)	Capacidade de transporte (número de passageiros)
GRANDE PORTE	S-61	630	203	17
MÉDIO PORTE	S-76A	700	237	10

Fonte: Banco de dados operacionais do Sistema de Informação do Transporte Aéreo da E&P-BC.

Como se pode observar, estes valores diferem um pouco dos valores máximos de especificação destas aeronaves apresentados em 4.2.3.

Os tempos associados aos procedimentos de aproximação, pouso e decolagem, em operações VFR, tanto em unidades marítimas como em aeródromos, podem ser considerados iguais para os helicópteros S-61 e S-76A, modelos estes exclusivamente utilizados atualmente pela PETROBRAS em seu sistema de distribuição física de passageiros, através do heliporto de São Tomé.

#### 4.2.5 – Dimensionamento atual

A forma atualmente adotada para dimensionamento da frota de helicópteros em atendimento às atividades *offshore* de exploração e produção da PETROBRAS na Bacia de Campos, parte da previsão de demanda mensal projetada para um horizonte de três anos, e consolidada por semestre, em relação à necessidade em números de helicópteros por porte.

Para definição destes números decide-se inicialmente pela quantidade de equipamentos de grande porte a utilizar, estabelecida com base na experiência operacional, e a partir da qual se complementa com o levantamento do número adicional necessário de aeronaves de médio porte necessários para atendimento total da demanda.

São utilizados na definição destes números as capacidades mensais de transporte de cada tipo de helicóptero, obtidas das realizações do período anterior, acrescido de um fator de desafio relativo à eficiência na programação dos vôos. Estas diferenças de capacidade de transporte estão relacionadas ao número de assentos disponíveis, à capacidade de carga e à autonomia, variáveis estas interdependentes, dada à limitação de peso, característica bem peculiar do transporte através de helicópteros.

Considerando que a atual sistemática para dimensionamento da frota de helicópteros, não garante a minimização da função de custos, e face aos altos valores de custos dos recursos envolvidos, vislumbra-se grandes oportunidades de ganho econômico com a utilização de um modelo de dimensionamento de frota que tenha por objetivo a minimização de custo com frota de transporte.

### 4.3 Adaptação do Modelo

Conforme já citado em 3.3.6 , o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983) se aplica a processos de distribuição física com um centro de distribuição único atendendo a diversos clientes, tanto para sistemas de viagens pendulares ( atendimento a um único cliente por viagem, com origem e destino no CD), assim como para viagens de atendimento múltiplo (atendimento à diversos clientes, com origem e destino no CD ).

O presente estudo, por tratar do atendimento às trocas regulares de turma das unidades marítimas da Bacia de Campos, que ocorrem através do heliporto de São Tomé, compreende em sua maioria viagens pendulares, determinando, portanto, a opção de cálculo das distâncias esperadas dos vôos característico das viagens de atendimento único, conforme se apresenta a seguir :

#### Viagens de atendimento único

$$e_t = 2 \sum_{i=1}^n c_i \quad t = 1, \dots, T$$

Outra consideração feita sobre o modelo original é a de trabalhar-se apenas com a opção de utilização de veículos próprios. Muito embora a PETROBRAS só possua frota alugada de helicópteros, estes contratos são de longo prazo de duração ( normalmente de 1 a 3 anos de duração ) e caracterizam-se por uma estrutura de preços igual àquela estabelecida no algoritmo original para a modalidade de frota própria. Os helicópteros alugados pela PETROBRAS possuem uma parcela de preço fixo mensal , independente da utilização ou não de uma dada aeronave em um determinado dia.

As dificuldades atuais e características do mercado de afretamento de aeronaves no Brasil de não dispor de oferta destes serviços para o pronto atendimento, geradas em decorrência das exigências de especificações e homologações especiais feitas para estes veículos, e demandadas ,atualmente, somente pelas atividades de exploração e produção

de petróleo na selva e no mar, inviabilizam a utilização de contratações de curtíssimo prazo (contratação *spot*).

Desta forma, em consequência da adaptação que se fez necessária sobre o modelo original de Etezadi e Beasley (1983) para aplicação ao estudo de caso da PETROBRAS, doravante desconsideram-se todas as variáveis e parâmetros relacionados ao que se denominou de frota alugada no modelo original:  $f_j$ ,  $v_j$ ,  $y_{jt}$  e  $w_{jt}$ . E além disto, todas as variáveis e parâmetros originalmente relacionadas à frota própria, passam a se referir neste estudo de caso à frota alugada de helicópteros da PETROBRAS. Portanto, a partir de agora onde estiver descrita uma variável ou parâmetro relacionados à frota alugada, sabemos se tratar do que no modelo original se denominou frota própria.

Esclarecidas estas questões, apresenta-se a seguir o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983) devidamente adaptado ao presente estudo de caso :

#### parâmetros de entrada

$c_i$  Distância entre o heliporto de São Tomé e a unidade marítima  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ).

$q_{it}$  Quantidade de passageiros a ser transportada para a unidade marítima  $i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), no dia  $t$  ( $t=1,2,\dots,T$ ).

$d_{it}$  Distância equivalente ao tempo de embarque/desembarque de passageiros na unidade marítima  $i$  no dia  $t$  ( Expressa a distância que o helicóptero poderia percorrer durante o tempo despendido no embarque/desembarque de passageiros na unidade marítima  $i$  no dia  $t$ ).

$D_j$  Máxima distância a ser percorrida em um dia pelo helicóptero tipo  $j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ).

$Q_j$  Máxima capacidade diária de transporte de passageiros do helicóptero tipo  $j$ .

$F_j$  Custo fixo do helicóptero alugado do tipo  $j$  para  $T$  períodos.

$V_j$  Custo variável (por distância percorrida) do helicóptero alugado do tipo  $j$ .

$e_t$  Distância esperada a ser percorrida (excluídas as distâncias equivalentes -  $d_{it}$ ) no dia  $t$ .

variáveis de resposta

$x_j$  Número de helicópteros alugados do tipo  $j$ .

$u_{jt}$  Número de helicópteros alugados do tipo  $j$  que são utilizados no atendimento no dia  $t$ .

$z_{jt}$  Distância percorrida (excluídas as distâncias equivalentes -  $d_{it}$ ) pelos helicópteros alugados do tipo  $j$  no dia  $t$ .

Função Objetivo

$$\min \sum_{j=1}^m (F_j x_j) + \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T (V_j z_{jt})$$

Identifica a alternativa possível de mínimo custo.

Restrições

$$u_{jt} \leq x_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que o número de helicópteros alugados utilizados em qualquer período não excede o número total de helicópteros alugados.

$$z_{jt} \leq u_{jt} D_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que as distâncias percorridas pelos helicópteros alugados, respectivamente, não excedem suas distâncias máximas diárias.

$$\sum_{j=1}^m (z_{jt}) = e_t, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que a distância total percorrida seja igual à distância total esperada.

$$\sum_{j=1}^m u_{jt} D_j \geq e_t + \sum_{i=1}^n d_{it}, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que as composições de helicópteros a serem testadas sejam capazes de percorrer a distância total demandada por todas as unidades marítimas em cada um dos dias.

$$\sum_{j=1}^m u_{jt} Q_j \geq \sum_{i=1}^n q_{it}, \quad t = 1, \dots, T$$

Garante que as composições de helicópteros a serem testadas tenham capacidade suficiente para transportar a quantidade total de passageiros demandada por todas as unidades marítimas em cada um dos dias.

$$z_{jt} \geq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

$$x_j, u_{jt} \text{ inteiros}, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T$$

### Viagens de atendimento único

$$e_t = 2 \sum_{i=1}^n c_i \quad t = 1, \dots, T$$

#### 4.4 Dados do Problema

Visando facilitar a abordagem deste estudo de caso , que mais do que ter o propósito de avaliar com precisão a solução encontrada para o dimensionamento de frota, objetiva averiguar a aplicabilidade do modelo selecionado ao tipo de problema logístico em questão, são adotadas algumas premissas simplificadoras sobre as variáveis que compõem o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983) , as quais são descritas a seguir , acompanhadas de seus valores, que formam o conjunto de dados de entrada utilizados para o teste do referido modelo .

##### parâmetro $c_i$

Representa a distância entre o heliporto de São Tomé e a unidade marítima  $i$  .

Como a distribuição física de pessoas através do heliporto de São Tomé compreende o atendimento a 73 unidades marítimas , então  $i = 1, \dots, 73$ .

Estas distâncias são apresentadas na tabela seguinte , com valores em quilômetros (km).

Tabela 4.3: Distâncias das Unidades Marítimas a São Tomé. (1/2)

Unidade Marítima	Distância (km)	Unidade Marítima	Distância (km)	Unidade Marítima	Distância (km)
U.M. 01	117,086	U.M. 18	82,026	U.M. 35	114,256
U.M. 02	119,115	U.M. 19	115,164	U.M. 36	92,265
U.M. 03	180,000	U.M. 20	84,914	U.M. 37	114,019
U.M. 04	79,213	U.M. 21	68,969	U.M. 38	102,630
U.M. 05	96,619	U.M. 22	86,256	U.M. 39	112,523
U.M. 06	141,219	U.M. 23	85,874	U.M. 40	131,722
U.M. 07	116,362	U.M. 24	110,746	U.M. 41	119,709
U.M. 08	293,100	U.M. 25	115,926	U.M. 42	84,435
U.M. 09	119,406	U.M. 26	111,963	U.M. 43	75,252
U.M. 10	114,445	U.M. 27	107,322	U.M. 44	78,410
U.M. 11	112,450	U.M. 28	94,156	U.M. 45	68,765
U.M. 12	118,138	U.M. 29	98,101	U.M. 46	71,049
U.M. 13	79,119	U.M. 30	114,607	U.M. 47	77,261
U.M. 14	137,084	U.M. 31	111,440	U.M. 48	80,312
U.M. 15	128,211	U.M. 32	119,654	U.M. 49	82,140
U.M. 16	89,949	U.M. 33	117,651	U.M. 50	80,171
U.M. 17	89,210	U.M. 34	102,739	U.M. 51	90,787

Tabela 4.3: Distâncias das Unidades Marítimas a São Tomé. (2/2)

Unidade Marítima	Distância (km)	Unidade Marítima	Distância (km)	Unidade Marítima	Distância (km)
U.M. 52	81,830	U.M. 60	104,022	U.M. 68	88,627
U.M. 53	80,899	U.M. 61	93,626	U.M. 69	154,047
U.M. 54	77,021	U.M. 62	88,458	U.M. 70	106,919
U.M. 55	139,989	U.M. 63	80,543	U.M. 71	113,811
U.M. 56	180,000	U.M. 64	114,197	U.M. 72	114,185
U.M. 57	88,063	U.M. 65	138,877	U.M. 73	80,540
U.M. 58	112,589	U.M. 66	100,965		
U.M. 59	91,117	U.M. 67	133,718		

Fonte: Sistema da PETROBRAS de Informação do Transporte Aéreo (STA)

#### parâmetro $q_{it}$

Representa a quantidade de passageiros a ser transportada para a unidade marítima  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 73$ ), no dia  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, 14$ ). Estas quantidades, que estão apresentadas no ANEXO 7.1, compreendem apenas os valores de uma “pernada”, isto é, de ida ou de volta, já que sempre ocorrem com valores iguais ou muito próximos, e assim tanto a demanda de ida como a de volta podem ser utilizadas indistintamente para o dimensionamento da frota de helicópteros, pois sendo a frota capaz de atender a demanda de passageiros para embarque nas unidades marítimas, também o será para atender à demanda de desembarque de passageiros das unidades marítimas para o heliporto de São Tomé.

#### parâmetro $d_{it}$

Representa a distância equivalente ao tempo de embarque/desembarque de passageiros na unidade marítima  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 73$ ), no dia  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, 14$ ). Expressa a distância que o helicóptero poderia percorrer durante o tempo despendido no embarque/desembarque de passageiros na unidade marítima  $i$  no dia  $t$ .

De forma a possibilitar a utilização do algoritmo de Etezadi e Beasley (1983) formulado sobre problemas onde as velocidades dos veículos não se constituem em

elemento de diferenciação, sobre esta variável foi aplicada a simplificação de se considerar o mesmo valor para o helicóptero S-61 e o helicóptero S-76 como igual a 66 km. Estimou-se este valor como sendo a distância que seria percorrida em um período de 18 minutos (tempo médio que as aeronaves passam no heliponto das unidades marítimas durante o desembarque e embarque de passageiros) por uma aeronave com velocidade de 220 km/h, igual à média dos valores das duas aeronaves em avaliação ( 203 km/h ou 110 knots para o S-61 e 237 km/h ou 128 knots para o S-76) .

#### parâmetro $D_j$

Representa a máxima distância a ser percorrida em um dia pelo helicóptero tipo  $j$  ( $j=1,2$ ).

Seus valores são obtidos pelo produto das velocidades operacionais médias dos dois modelos de aeronaves utilizadas em São Tomé pelo limite diário de 6 horas (período médio no ano com luz do dia).

Assim sendo, os valores resultantes são de 1222 km para o S-61 e de 1422 km para o S-76.

#### parâmetro $Q_j$

Representa a máxima capacidade diária de transporte de passageiros do helicóptero tipo  $j$  ( $j=1,2$ ).

Seus valores são obtidos pelo produto das capacidades de transporte de cada aeronave por vôo ( 17 passageiros por vôo para o S-61 e 10 passageiros por vôo para o S-76) pelas médias anuais de números de viagens por dia característicos de cada tipo de helicóptero (3,5 viagens/dia para o S-61 e 3,8 viagens/dia para o S-76).

Os valores resultantes são: 59 passageiros/dia para o S-61 e 38 passageiros/dia para o S-76).

Sobre esta variável também é aplicada uma simplificação ao se utilizar o número médio de viagens diárias de cada modelo para se obter as suas capacidades diárias de transporte. Esta simplificação foi necessária para a utilização do algoritmo de Etezadi e Beasley (1983), por se trabalhar com a unidade mínima de tempo de um dia, desconsiderando portanto o tratamento discriminado do número diário de viagens.

#### parâmetro $F_j$

Representa o custo fixo do helicóptero alugado do tipo  $j$  ( $j=1,2$ ) para  $T$  períodos ( $T=1,2,\dots,14$ ).

Embora as parcelas fixas dos afretamentos dos helicópteros sejam pagas pela PETROBRAS para períodos mensais, conforme está apresentado no item 4.2.3.6, para ajuste ao modelo de Etezadi e Beasley (1983), os valores considerados para o período de 14 dias, que caracteriza o ciclo completo da demanda, foram tomados como sendo os seguintes: R\$ 142.500,00 para o S-61 e R\$ 67.500 para o S-76.

#### parâmetro $V_j$

Representa o custo variável do helicóptero alugado do tipo  $j$  ( $j=1,2$ ) por km percorrido.

Apesar das parcelas variáveis dos afretamentos dos helicópteros serem pagas pela PETROBRAS por hora de voo, conforme está apresentado no item 4.2.3.6, para ajuste ao modelo de Etezadi e Beasley (1983), é feita a conversão daqueles valores de reais por hora de voo para reais por quilômetro de voo, dividindo-os pelas velocidades dos respectivos tipos de helicópteros (203 km/h para o S-61 e 237 km/h para o S-76), redundando assim nos valores de : R\$ 8,60/km para o S-61 e R\$ 6,40/km para o S-76.

## 4.5 Programa Utilizado

O software utilizado para modelação do algoritmo de Etezadi e Beasley (1983), adaptado ao estudo de caso em questão, foi o ILOG Solver, da companhia francesa ILOG S.A.

O ILOG Solver é o que se pode chamar de uma biblioteca em linguagem C++, para resolução de problemas combinatórios que buscam otimização da solução. Sua estrutura básica é a programação linear associada a algoritmos específicos de otimização.

Sua concepção lógica compreende duas atividades distintas, que embora ocorram concomitantes e interativamente durante o seu processamento, dividem-se didaticamente em: Representação do problema e Busca da solução.

### Representação do problema:

Consiste no estabelecimento do sistema de equações/inequações, seus domínios relativos às variáveis conhecidas (variáveis de entrada) e às variáveis desconhecidas (variáveis de resposta) impostos pelas condições de contorno e restrições do problema. Em resumo, se estabelece o domínio inicial das soluções possíveis de um dado sistema de equações/inequações com restrições.

### Busca da solução:

Consiste em a partir do estabelecimento da função objetivo e seu mecanismo de busca da solução ótima (maximização, minimização ou busca de um valor específico), processa-se a busca da solução ótima, dentro do domínio de soluções possíveis, para identificação dos valores de cada variável desconhecida, que conferem a solução ótima.

O ILOG solver possui algoritmos internos de otimização do tipo *branch and bound*, permitindo entretanto a sua utilização com outros algoritmos, desde que programados em C++.

O ANEXO 7.2 apresenta o programa fonte, desenvolvido em C++, subdividido em seus dois módulos citados acima e comentado ao longo de todo seu conteúdo: função objetivo, variáveis de entrada, restrições e soluções.

## 4.6 Resultados

A execução do ILOG solver sobre o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983), adaptado ao estudo de caso, compreendeu no seu processamento: 2.276 iterações, 161 variáveis, 242 restrições, em um tempo total de 4,155 s (4 segundos e 155 milésimos de segundo). O micro usado foi um Pentium III 500Mhz 256MB HD SCSI 4GB com Windows 95, compilador Borland C++ Builder versão 3.0 e Bibliotecas ILOG SOLVER versão 4.4.

O resultado desta execução apontou para as seguintes três melhores soluções, as quais descrevemos a seguir com seus respectivos valores de custo associado (soma das parcelas fixas e variáveis) para um período de 14 dias, valores estes que resultaram da minimização da função objetivo visando a seleção das melhores alternativas de configuração de frota:

- 1) 08 helicópteros médios – R\$ 877.771,00;
- 2) 01 helicóptero grande e 07 médios – R\$ 952.593,00;
- 3) 02 helicópteros grandes e 05 médios – R\$ 959.886,00.

Do ponto de vista quantitativo (*fleet sizing*), o resultado aponta para uma frota ótima entre 8 e 7 helicópteros.

Do ponto de vista qualitativo (*fleet composition*), o resultado aponta para utilização de helicópteros de médio porte do tipo S-76A como melhor opção para as condições do problema específico do estudo de caso.

Quando comparado com o resultado do dimensionamento da frota pelo método empírico, utilizado atualmente e descrito em 4.2.5, o resultado surpreende pela proximidade de seus resultados, já que o método atualmente utilizado indica para o mesmo problema a composição de frota dada por 02 helicópteros de grande porte do modelo S-61 e 06 helicópteros de médio porte do tipo S-76A.

Este resultado, de certa forma, ratifica a adequação da escolha do modelo de Etezadi e Beasley (1983) ao problema de dimensionamento de frota de helicópteros voltado à distribuição física de pessoas em uma bacia petrolífera, já que tanto do ponto de vista quantitativo como qualitativo seu resultado está muito próximo do indicado pelo método empírico.

O resultado da aplicação do modelo Etezadi e Beasley (1983) incorpora um ganho ao resultado obtido pelo método empírico, quando sinaliza que a opção por helicópteros de médio porte conduz a soluções melhores que aquelas que incorporam helicópteros de grande porte.

Embora o dimensionamento atual indique a utilização de 02 helicópteros de grande porte e 06 helicópteros de médio porte, na prática estão sendo utilizados 02 helicópteros de grande porte e 05 helicópteros de médio porte representando um ajuste operacional sobre o método empírico do dimensionamento. De certa forma, o resultado da execução do ILOG solver apontou em sua terceira solução esta indicação, o que referenda o conceito prático de que método empírico normalmente conduz a boas soluções, mas não necessariamente a melhor.

Estes resultados mais do que surpreendentes pelos seus valores, revelam as potencialidades do modelo adotado, que do ponto de vista do planejamento conferem grande agilidade para tomadas de decisão, por possibilitar análises do tipo "What if ?" em situações freqüentes de mudanças de cenários, decorrentes de variações de preços de helicópteros, dos tipos dos helicópteros e conseqüentemente de suas características operacionais, dos dados de demanda, etc.

## 5 CONCLUSÃO

A partir da identificação de alguns modelos apropriados ao dimensionamento de frotas de veículos e seleção e teste do modelo de Etezadi e Beasley (1983) pela sua aplicação a um caso prático, vislumbram-se, além dos limites do resultado deste trabalho do ponto de vista acadêmico ou científico, oportunidades imediatas de sua aplicação, quanto aos aspectos econômico e de negócios, bastante significativas, pelas suas potencialidades quanto ao seu uso como ferramenta de apoio a tomada de decisão na atividade de planejamento de frota de veículos.

O modelo selecionado de Etezadi e Beasley (1983) permite de forma ágil e sem praticamente custo algum efetuar-se análises do tipo “ what if?”<sup>7</sup>, que possibilitam analisar diversos cenários futuros, sem, necessariamente, efetuar experimentos práticos e reais, que normalmente envolvem custos elevados.

Variações tais como taxas de afretamento de helicópteros ou de demanda são fácil e rapidamente avaliados quanto aos seus impactos sobre o que se espera ser a frota ótima, permitindo de forma ágil e sem custos de experimentação prática, a adequação contínua da frota às mudanças das condições do sistema.

Diante dos resultados e conclusões descritas acima vislumbram-se oportunidades de ganho (econômico e operacional) com a incorporação da aplicação do modelo aqui desenvolvido no processo de dimensionamento de frota de helicópteros para as operações da PETROBRAS na Bacia de Campos.

---

<sup>7</sup> Análises do tipo “ what if?” – Análises do tipo “ O que fazer, se...?”

## 6 FONTES BIBLIOGRÁFICAS

### 6.1 Bibliografía Principal

COUILLARD J. – **A Decision Support System for Vehicle Fleet Planning**, Decision Support Systems V.9. N.2 p 149 – 159 , 1993.

ETEZADI T. , and BEASLEY J. E. – **Vehicle Feet Composition**. Journal of Operational Research Society 34, p. 87-91,1983.

GOULD J. – **The Size and Composition of a Road Transportation fleet**. Operational Research Quarterly 20, p.81-92, 1969.

KIRBY P.– **Is Your Fleet the Right Size?**. Operational Research Quarterly 10, p.252, 1959.

MOLE R. H. – **Dynamic Optimization of Vehicle Fleet Size**. Operational Research Quarterly 26, p.25-34, 1975.

PARIKH S. C. – **On a Fleet Sizing Problem and Allocation Problem**. Management Science 23, N.9, p.972-977, 1977.

WYATT J. K. – **Optimal Fleet Size**. Operational Research Quarterly 12, p.186-187, 1961.

## 6.2 Bibliografia Complementar

AVRAMOVICH D. , COOK D. T. T. , LANGSTON G. D. and SUTHERLAND F. – **A Decision Support System for Fleet Management: A Linear Programming Approach**, Interfaces 12, p.3, 1982.

BALLOU, R. – **Logística Empresarial**, Editora Atlas, São Paulo, 1993 .

BOWERSOX D., and CLOSS D. – **Logistical Management. The integrated Supply Chain Process**. The McGraw-Hill , New York, 1996 .

CLARKE G. , and WRIGHT J. – **Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points**. Opns Res. 12, p.568-581, 1964.

CRHRISTOPHER , M. – **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. Editora Pioneira, São Paulo, 1997 .

EILON S. , WATSON GANDY C. D. T., and HEILBRON A . – **A vehicle fleet costs more**. Int. J. Physical Distribution 1, p.126-132, 1971.

HILLIER, F. & LIEBERMAN, G. – **Introducción a la Investigación de Operaciones**; 3ª Edición; Mc Graw-Hill; 1991.

LAMBERT, D., and STOCK J. – **Strategic Logistics Management**. Irwin, Chicago, 1993 .

NEW C. C. – **Transport Fleet Planning for Multi-Period Operations**, Operational Research Quarterly 26, p. 151-166, 1975.

NOVAES, A.G., 1935 – **Métodos de Otimização: Aplicação aos Transportes** – Edgard Blücher: TRANSESP, São Paulo, 1978.

NOVAES, A.G. – **Transporte, Armazenagem e Distribuição Física de Produtos** – Edgard Blücher, São Paulo, 1989.

NOVAES, A.G. – **Logística Aplicada: Suprimentos e Distribuição Física**, Editora Pioneira, São Paulo, 1994.

WOODS D. G. , and HARRIS F. C. – **Truck fleet size composition for concrete distribution**. Int. J. Physical Distribution 10, p.3-14, 1979.

MAKRIDAKIS S. – **Forecasting, Methods and Applications**, Third Edition., et al. Wiley, 1998.

## 7 ANEXOS

## 7.1 Anexo – Demandas Diárias Das Unidades Marítimas

Tabela 7.1: Demandas diárias das Unidades Marítimas por São Tomé.(1/4)

U.M.	Dia													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
01	0	0	34	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
02	0	19	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0
03	0	24	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0
04	0	0	0	8	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
05	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	12
06	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	19	0
07	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	27
08	0	29	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0
09	0	0	25	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0
10	20	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	28	0	0
12	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	28	0	0
13	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	33
14	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20	0
15	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	20	0
16	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0
17	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0
18	0	0	13	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0
19	0	0	20	0	0	0	24	0	0	20	0	0	0	14
20	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	15	0	0

Tabela 7.1: Demandas diárias das Unidades Marítimas por São Tomé.(2/4)

U.M.	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Dia 13	Dia 14
21	0	11	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
22	0	0	9	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
23	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0
24	19	0	0	18	0	0	0	21	0	0	18	0	0	0
25	0	18	30	0	0	0	0	0	14	15	0	0	0	0
26	22	0	46	0	11	0	0	3	0	46	0	2	0	0
27	18	0	0	0	0	0	43	20	0	0	0	0	0	48
28	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0
29	23	0	10	0	0	0	0	23	0	8	0	0	0	0
30	0	0	18	0	24	0	0	0	0	17	22	0	0	0
31	0	12	0	0	0	0	22	0	12	0	0	0	15	0
32	0	0	14	0	0	0	27	0	0	14	0	0	0	25
33	48	0	0	0	19	0	28	0	0	0	0	16	0	0
34	25	0	0	12	0	0	0	16	0	0	12	0	0	0
35	0	0	0	15	41	0	0	0	0	0	15	16	0	0
36	0	15	0	34	0	0	0	0	14	38	0	0	0	0
37	0	0	21	0	20	0	0	0	0	18	50	0	0	0
38	0	15	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
39	0	0	13	0	0	40	0	0	0	13	0	0	43	0
40	0	0	0	26	40	0	0	0	0	0	26	40	0	0
41	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0
42	0	0	18	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0
43	5	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.1: Demandas diárias das Unidades Marítimas por São Tomé.(3/4)

U.M.	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10	Dia 11	Dia 12	Dia 13	Dia 14
44	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0
45	6	0	0	0	7	0	0	1	0	0	0	2	0	0
46	10	0	0	0	7	0	0	5	0	0	0	1	0	0
47	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	14	0	0
48	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	16	0	0
49	4	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
50	25	0	0	0	10	0	0	30	0	0	0	11	0	0
51	5	22	0	0	2	0	0	9	25	0	0	2	0	0
52	7	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	4	0	0
53	3	0	0	0	2	0	0	9	0	0	0	4	0	0
54	0	28	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0
55	0	18	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	19	0
57	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	16	0
59	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	29
60	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	18	0
61	0	39	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0
62	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	34
64	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0
65	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0
66	0	29	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0

Tabela 7.1: Demandas diárias das Unidades Marítimas por São Tomé.(4/4)

U.M.	Dia													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
67	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	33	0
68	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	17	0
69	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	31	0
70	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	25	0
71	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	26
72	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	12	0
73	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	27

Fonte: Sistema da PETROBRAS de Informação do Transporte Aéreo (STA)

## 7.2 Anexo – Programa Fonte

Quadro 7.1: Programa Fonte e Resultados (1/13)

### REPRESENTAÇÃO do PROBLEMA

```
#pragma hdrstop
#include <condefs.h>

//-----
USELIB("..\\..\\..\\ILOG\\SOLVER44\\lib\\bcb30\\stat_st\\ilcfloat.lib");
USELIB("..\\..\\..\\ILOG\\SOLVER44\\lib\\bcb30\\stat_st\\solver.lib");
//-----
#pragma argsused

#include <ilsolver/ilcint.h>
#include <ilsolver/ilcfloat.h>
#include <ilsolver/ilcany.h>
#include <ilsolver/basic.h>
#define DIST_MAX 10000000
```

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (2/13)

```
ILCSTLBEGIN
```

```
int main() {
```

```
    IlcInitFloat();
    IlcManager m(IlcEdit);
    m.setDefaultPrecision( 1 );
```

```
#if defined(ILCLOGFILE)
    m.openLogFile("heli8.log");
#endif
```

```
//
// declaração de variáveis auxiliares
//
IlcInt i,j,k;
```

```
//
// declaração das variáveis de configuração de número de elementos
//
IlcInt N = 73;          // Número de plataformas
IlcInt T = 14;         // Número de dias ( 2 trocas de turma)
IlcInt J = 2;          // Número de tipos de helicóptero
IlcInt MaxHelicoptero = 10; // Número máximo de helicópteros de um tipo que o Solver
pode achar
```

```
// Distância equivalente a ser atribuída as posições da matriz 'D' que tiverem valor de
demanda 'Q'
// na posição correspondente
IlcInt DistanciaEquivalente = 66000;
```

```
//
// declaração das variáveis de entrada
//
```

```
// Distância 'C' do ponto de partida(heliporto de São Tomé) até a unidade marítima
IlcIntArray C(m, N);
```

```
// Demanda 'Q' de passageiros a ser atendida na unidade marítima 'n' no período 't'
IlcIntArray* Q = new IlcIntArray[N];
for (i=0;i<N;++i) Q[i] = IlcIntArray(m,T);
```

```
// Distância equivalente ao tempo de entrega
IlcIntArray* D = new IlcIntArray[N];
for (i=0;i<N;++i) D[i] = IlcIntArray(m,T);
```

```
// Máxima distância 'D' a ser percorrida em um período por um helicóptero tipo 'J'
IlcIntArray DM(m,J);
```

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (3/13)

```

// Máxima capacidade de transporte do helicóptero tipo 'J'
llcIntArray QM(m,J);

// Custo Fixo do helicóptero tipo 'J' para 'T' períodos
llcIntArray F(m,J);

// Custo variável ( por distância percorrida) do helicóptero do tipo 'J'
llcFloatArray V(m,J);

//
// declaração das variáveis de resposta
//

// Número de helicópteros do tipo 'J'
llcIntVarArray X(m,J,0,MaxHelicoptero);

// Número de helicópteros do tipo 'J' que são utilizados no atendimento no período 'T'
llcIntVarArray* U = new llcIntVarArray[J];
for (i=0;i<J;++i) U[i] = llcIntVarArray(m,T,0,MaxHelicoptero);

// Distância percorrida (excluídas as distâncias equivalentes) pelos helicópteros tipo 'J'
no período 'T'
llcFloatVarArray* Z = new llcFloatVarArray[J];
for (i=0;i<J;++i) Z[i] = llcFloatVarArray(m,T,0,DIST_MAX);

// Distância esperada a ser percorrida(excluídas as distâncias equivalentes) no período
'T' por todos os helicópteros
llcIntVarArray E(m,T,0,DIST_MAX);

//
// carga dos dados de entrada
//

// Distância 'C' do ponto de partida (heliporto de São Tomé) até a unidade marítima
C[0]=117086; C[1]=119115; C[2]=180000; C[3]=79213; C[4]=96619; C[5]=141219;
C[6]=116362; C[7]=293100;
C[8]=119406; C[9]=114445; C[10]=112450; C[11]=118138; C[12]=79119;
C[13]=137084; C[14]=128211;C[15]=89949;
C[16]=89210; C[17]=82026; C[18]=115164; C[19]=84914; C[20]=68969; C[21]=86256;
C[22]=85874; C[23]=110746;
C[24]=115926; C[25]=111963; C[26]=107322; C[27]=94156; C[28]=98101;
C[29]=114607; C[30]=111440; C[31]=119654;
C[32]=117651; C[33]=102739; C[34]=114256; C[35]=92265; C[36]=114019;
C[37]=102630; C[38]=112523; C[39]=131722;
C[40]=119709; C[41]=84435; C[42]=75252; C[43]=78410; C[44]=68765; C[45]=71049;
C[46]=77261; C[47]=80312;

```

Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (4/13)

```

C[48]=82140; C[49]=80171; C[50]=90787; C[51]=81830; C[52]=80899; C[53]=77021;
C[54]=139989; C[55]=180000;
  C[56]=88063; C[57]=112589; C[58]=91117; C[59]=104022; C[60]=93626;
C[61]=88458; C[62]=80543; C[63]=114197;
C[64]=138877; C[65]=100965; C[66]=133718; C[67]=88627; C[68]=154047;
C[69]=106919; C[70]=113811; C[71]=114185;
  C[72]=80540;

```

```
// Demanda 'Q' de passageiros a ser atendida na unidade marítima 'i' no período 't'
```

```
for (i=0;i<N;++i)
```

```
  for (j=0;j<T;++j)
```

```
    Q[i][j] = 0;
```

```
Q[0][2] = 34; Q[0][9] = 20;
```

```
Q[1][1] = 19; Q[1][8] = 21;
```

```
Q[2][1] = 24; Q[2][8] = 27;
```

```
Q[3][3] = 8; Q[3][10] = 9;
```

```
Q[4][6] = 12; Q[4][13] = 12;
```

```
Q[5][5] = 25; Q[5][12] = 19;
```

```
Q[6][6] = 38; Q[6][13] = 27;
```

```
Q[7][1] = 29; Q[7][8] = 38;
```

```
Q[8][2] = 25; Q[8][9] = 25;
```

```
Q[9][0] = 20; Q[9][7] = 27;
```

```
Q[10][4] = 27; Q[10][11] = 28;
```

```
Q[11][4] = 29; Q[11][11] = 28;
```

```
Q[12][6] = 41; Q[12][13] = 33;
```

```
Q[13][5] = 20; Q[13][12] = 20;
```

```
Q[14][5] = 18; Q[14][12] = 20;
```

```
Q[15][3] = 17; Q[15][10] = 17;
```

```
Q[16][3] = 16; Q[16][10] = 15;
```

```
Q[17][2] = 13; Q[17][9] = 14;
```

```
Q[18][2] = 20; Q[18][6] = 24; Q[18][9] = 20; Q[18][13] = 14;
```

```
Q[19][4] = 9; Q[19][11] = 15;
```

```
Q[20][1] = 11; Q[20][8] = 8;
```

```
Q[21][2] = 9; Q[21][9] = 12;
```

```
Q[22][3] = 41; Q[22][10] = 41;
```

```
Q[23][0] = 19; Q[23][3] = 18; Q[23][7] = 21; Q[23][10] = 18;
```

```
Q[24][1] = 18; Q[24][2] = 30; Q[24][8] = 14; Q[24][9] = 15;
```

```
Q[25][0] = 22; Q[25][2] = 46; Q[25][4] = 11; Q[25][7] = 3; Q[25][9] = 46;
```

```
Q[25][11] = 2;
```

```
Q[26][0] = 18; Q[26][6] = 43; Q[26][7] = 20; Q[26][13] = 48;
```

```
Q[27][3] = 16; Q[27][10] = 16;
```

```
Q[28][0] = 23; Q[28][2] = 10; Q[28][7] = 23; Q[28][9] = 8;
```

Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (5/13)

Q[29][2] = 18; Q[29][4] = 24; Q[29][9] = 17; Q[29][11] = 22 ;  
 Q[30][1] = 12; Q[30][6] = 22; Q[30][8] = 12; Q[30][13] = 15 ;  
 Q[31][2] = 14; Q[31][6] = 27; Q[31][9] = 14; Q[31][13] = 25 ;  
 Q[32][0] = 48; Q[32][4] = 19; Q[32][7] = 28; Q[32][11] = 16 ;  
 Q[33][0] = 25; Q[33][3] = 12; Q[33][7] = 16; Q[33][10] = 12 ;  
 Q[34][3] = 15; Q[34][4] = 41; Q[34][10] = 15; Q[34][11] = 16 ;  
 Q[35][1] = 15; Q[35][3] = 34; Q[35][8] = 14; Q[35][10] = 38 ;  
 Q[36][2] = 21; Q[36][4] = 20; Q[36][9] = 18; Q[36][11] = 50 ;  
 Q[37][1] = 15; Q[37][8] = 12;  
 Q[38][2] = 13; Q[38][5] = 40; Q[38][9] = 13; Q[38][12] = 43 ;  
 Q[39][3] = 26; Q[39][4] = 40; Q[39][10] = 26; Q[39][11] = 40 ;

Q[40][4] = 29; Q[40][11] = 29;  
 Q[41][2] = 18; Q[41][9] = 16;  
 Q[42][0] = 5; Q[42][7] = 16;  
 Q[43][2] = 15; Q[43][9] = 15;  
 Q[44][0] = 6; Q[44][4] = 7; Q[44][7] = 1; Q[44][11] = 2 ;  
 Q[45][0] = 10; Q[45][4] = 7; Q[45][7] = 5; Q[45][11] = 1 ;  
 Q[46][4] = 1; Q[46][11] = 14;  
 Q[47][4] = 17; Q[47][11] = 16;  
 Q[48][0] = 4; Q[48][7] = 13;  
 Q[49][0] = 25; Q[49][4] = 10; Q[49][7] = 30; Q[49][11] = 11 ;

Q[50][0] = 5; Q[50][1] = 22; Q[50][4] = 2; Q[50][7] = 9; Q[50][8] = 25;  
 Q[50][11] = 2 ;

Q[51][0] = 7; Q[51][4] = 4; Q[51][7] = 3; Q[51][11] = 4 ;  
 Q[52][0] = 3; Q[52][4] = 2; Q[52][7] = 9; Q[52][11] = 4 ;  
 Q[53][1] = 28; Q[53][8] = 26;  
 Q[54][1] = 18; Q[54][8] = 4;  
 Q[55][5] = 35; Q[55][12] = 19;  
 Q[56][3] = 1; Q[56][10] = 0;  
 Q[57][5] = 24; Q[57][12] = 16;  
 Q[58][6] = 19; Q[58][13] = 29;  
 Q[59][5] = 21; Q[59][12] = 18;

Q[60][1] = 39; Q[60][8] = 27 ;  
 Q[61][3] = 29; Q[61][10] = 29;  
 Q[62][6] = 22; Q[62][13] = 34;  
 Q[63][3] = 29; Q[63][10] = 29;  
 Q[64][3] = 23; Q[64][10] = 28;  
 Q[65][1] = 29; Q[65][8] = 25 ;  
 Q[66][5] = 22; Q[66][12] = 33;  
 Q[67][5] = 28; Q[67][12] = 17;  
 Q[68][5] = 26; Q[68][12] = 31;  
 Q[69][5] = 15; Q[69][12] = 25;

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (6/13)

```

Q[70][6] = 21; Q[70][13] = 26;
  Q[71][5] = 10; Q[71][12] = 12;
Q[72][6] = 19; Q[72][13] = 27;

// Distância (em m) equivalente ao tempo de entrega a qualquer unidade marítima em
qualquer período,
// atribui zero se valor de Q correspondente é zero, caso contrario atribui 66000
for (i=0;i<N;++i)
  for (j=0;j<T;++j)
    if ( Q[i][j] == 0 )
      D[i][j] = 0;
    else
      D[i][j] = DistanciaEquivalente;

// Máxima distância 'D' (em m) a ser percorrida em um período por um helicóptero tipo 'J'
DM[1] = 1222000;
DM[0] = 1422000;

// Máxima capacidade de transporte do helicóptero tipo 'J'
QM[1] = 59; // 17 * 3.5 = 59
QM[0] = 38; // 10 * 3.8 = 38

// Custo Fixo do helicóptero tipo 'J' para 'T' períodos ( em Reais)
F[1] = 142500; // 285000/2 = 142500
F[0] = 67500; // 135000/2 = 67500

// Custo variável ( por m de distância percorrida) do helicóptero do tipo 'J' (em Reais/m)
V[1] = 0.0086; // 1750/203000=0.0086
V[0] = 0.0064; // 1520/237000=0.0064

//
// Restrições
//

// Número de helicópteros utilizados 'X' menor ou igual ao total de helicópteros 'U'
//
for (i=0;i<J;++i)
  m.add(X[i] == llcMax(U[i]) );

//
// Distância percorrida pelo helicóptero menor ou igual à distância máxima no período
//
for (i=0;i<J;++i)
  for (j=0;j<T;++j)
    m.add ( Z[i][j] <= (U[i][j] * DM[i]) );

```

Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (7/13)

```

//
// Distância total percorrida igual à distância total esperada no período
//
for (i=0;i<T;++i)
{
m.add( Z[0][i] == (U[0][i]*E[i]*1.16)/(U[0][i]+U[1][i]));
m.add( Z[1][i] == (U[1][i]*E[i]*0.86)/(U[0][i]+U[1][i]));
}

//
// Composições de helicópteros capazes de atender a distância total demandada
// por todas as unidades marítimas em cada um dos períodos
//
llcIntVarArray UxDMaux(m,J,0,MaxHelicoptero);
llcIntArray Daux(m,N);
for (i=0;i<T;++i)
{
for (j=0;j<J;++j)
{UxDMaux[j] = U [j][i] * DM [j]; m.add( UxDMaux[j] == U [j][i] * DM [j] ); }
for (k=0;k<N;++k)
Daux[k] = D[k][i];
m.add( llcSum(UxDMaux) >= (E[i] + llcSum(Daux)) );
}

//
// Composições dos helicópteros podem transportar a demanda total das unidades
// marítimas em cada período
//
llcIntVarArray UxQMAux(m,J,0,100000);
llcIntArray Qaux(m,N);
for (i=0;i<T;++i)
{
for (j=0;j<J;++j)
{UxQMAux[j] = U[j][i] * QM [j]; m.add( UxQMAux[j] == U[j][i] * QM [j] ); }
for (k=0;k<N;++k)
Qaux[k] = Q [k][i];
m.add( llcSum(UxQMAux) >= llcSum(Qaux) );

// RESTRIÇÃO EXTRA : NÃO PODEM FICAR HELICÓPTEROS OCIOSOS NA
// ALOCAÇÃO DE UM DIA
// ESTA RESTRIÇÃO TEM COMO OBJETIVO REDUZIR O ESPAÇO DE BUSCA
m.add((llcSum(UxQMAux) - llcSum(Qaux)) < llcMin(QM));
}

// RESTRINGE A SOLUÇÃO EM 10 HELICÓPTEROS NO MÁXIMO
m.add( llcSum(X) <= 10 );

```

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (8/13)

```
// Viagens de Atendimento único  $e(t) = 2 * \text{SUM}(c(i,t))$ 
  IlcIntArray Caux(m,N); // C auxiliar : zera os clientes para os quais não há demanda
  for (i=0;i<T;++i)
  {
    for(j = 0; j < N; j++) if( Q[j][i] == 0 ) Caux[j] = 0; else Caux[j] = C[j];
    m.add( E[i] == 2 * IlcSum(Caux) );
  }
```

**BUSCA DA SOLUÇÃO**

```
//
// Minimização da Função Objetivo
//
  IlcFloatVar obj = (F[0]*X[0+0]) + (F[1]*X[1]) + (V[0]*Z[0][0+0]) + (V[1]*Z[1][0+0]) +
  (V[0]*Z[0][1]) + (V[1]*Z[1][1]) + (V[0]*Z[0][2]) + (V[1]*Z[1][2]) + (V[0]*Z[0][3]) + (V[1]*Z[1][3]) +
  (V[0]*Z[0][4]) + (V[1]*Z[1][4]) + (V[0]*Z[0][5]) + (V[1]*Z[1][5]) + (V[0]*Z[0][6]) + (V[1]*Z[1][6]) +
  (V[0]*Z[0][7]) + (V[1]*Z[1][7]) + (V[0]*Z[0][8]) + (V[1]*Z[1][8]) + (V[0]*Z[0][9]) + (V[1]*Z[1][9]) +
  (V[0]*Z[0][10]) + (V[1]*Z[1][10]) + (V[0]*Z[0][11]) + (V[1]*Z[1][11]) + (V[0]*Z[0][12]) +
  (V[1]*Z[1][12]) + (V[0]*Z[0][13]) + (V[1]*Z[1][13]);

//
// Array auxiliar para a solução
//
  IlcIntArray Uaux (m,T*J,0,MaxHelicoptero);
  k = 0;
  for (i=0;i<J;++i)
  {
    for (j=0;j<T;++j)
    {
      Uaux[k]=U[i][j];
      m.add( Uaux[k] == U[i][j] );
      ++k;
    }
  }
//
// Solução
//

// Armazena soluções intermediárias para se chegar à melhor
Uaux.setStorable();
Z[0].setStorable();
Z[1].setStorable();
X.setStorable();

// Define as variáveis as quais se quer conhecer o valor
m.add(IlcGenerate(Uaux));
```

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (9/13)

```

m.add(licGenerate(Z[0]));
m.add(licGenerate(Z[1]));
m.add(licGenerate(X));

// Define função objetivo
m.setObjMin(obj,1000);

// Laço para a busca de soluções
int numero_de_solucoes = 0;
while (m.nextSolution()){
    m.out() << endl << "Função Objetivo : " << obj << endl;
    m.out() << "Valor : [" << obj.getMin() << "]" << endl;
    m.out() << "U : " << Uaux << endl;
    m.out() << "X : " << X << endl;
    m.out() << "Z[0]:" <<
Z[0][0+0]+Z[0][1]+Z[0][2]+Z[0][3]+Z[0][4]+Z[0][5]+Z[0][6]+Z[0][7]+Z[0][8]+Z[0][9]+Z[0][10]+Z
[0][11]+Z[0][12]+Z[0][13] << endl;
    m.out() << "Z[1]:" <<
Z[1][0+0]+Z[1][1]+Z[1][2]+Z[1][3]+Z[1][4]+Z[1][5]+Z[1][6]+Z[1][7]+Z[1][8]+Z[1][9]+Z[1][10]+Z
[1][11]+Z[1][12]+Z[1][13] << endl;
    m.out() << "E : " << E << endl;
    m.storeSolution();
    numero_de_solucoes++;
}

// Exibe a melhor solução
m.restart();
if (m.nextSolution()) {
    m.out() << endl << "NÚMERO DE SOLUÇÕES : " << numero_de_solucoes << endl;
    m.out() << "Solução ótima : " << obj << endl;
    m.out() << "U : " << Uaux << endl;
    m.out() << "X : " << X << endl;
    m.out() << "Z[0]:" <<
Z[0][0+0]+Z[0][1]+Z[0][2]+Z[0][3]+Z[0][4]+Z[0][5]+Z[0][6]+Z[0][7]+Z[0][8]+Z[0][9]+Z[0][10]+Z
[0][11]+Z[0][12]+Z[0][13] << endl;
    m.out() << "Z[1]:" <<
Z[1][0+0]+Z[1][1]+Z[1][2]+Z[1][3]+Z[1][4]+Z[1][5]+Z[1][6]+Z[1][7]+Z[1][8]+Z[1][9]+Z[1][10]+Z
[1][11]+Z[1][12]+Z[1][13] << endl;
    m.out() << "E : " << E << endl;
}

#ifdef ILCLOGFILE
    m.closeLogFile();
#endif

```

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (10/13)

```
m.printInformation();
```

```
    m.end();
    return 0;
}
```

Função Objetivo :  $67500 * [1] + 142500 * [5] + 0.0064 * [646751] + 0.0086 * [1.91795e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.72763e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.52767e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.44193e+06] + 0.0064 * [684594] + 0.0086 * [2.53772e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [4.58749e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [1.91211e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.39744e+06] + 0.0064 * [735827] + 0.0086 * [2.18211e+06] + 0.0064 * [681883] + 0.0086 * [2.02214e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.29046e+06] + 0.0064 * [684594] + 0.0086 * [2.53772e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [4.58749e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [1.91211e+06]$

Valor :  $[1.11658e+06]$

U :  $llcIntVarArray[[[1] [0] [0] [0] [1] [0] [0] [0] [1] [1] [0] [1] [0] [0] [4] [5] [5] [5] [5] [5] [5] [4] [4] [4] [5] [5] [5] [5]]]$

X :  $llcIntVarArray[[[1] [5]]]$

Z[0]:  $[646751..646751] + [0] + [0] + [0] + [684594] + [0] + [0] + [0] + [735827..735827] + [681883..681883] + [0] + [684594..684594] + [0] + [0]$

Z[1]:  $[1.91795e+06..1.91795e+06] + [2.72763e+06..2.72763e+06] + [2.52767e+06..2.52767e+06] + [2.44193e+06..2.44193e+06] + [2.53772e+06..2.53772e+06] + [4.58749e+06..4.58749e+06] + [1.91211e+06..1.91211e+06] + [2.39744e+06..2.39744e+06] + [2.18211e+06..2.18211e+06] + [2.02214e+06..2.02214e+06] + [2.29046e+06..2.29046e+06] + [2.53772e+06..2.53772e+06] + [4.58749e+06..4.58749e+06] + [1.91211e+06..1.91211e+06]$

E :  $llcIntVarArray[[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288] [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]]$

Função Objetivo :  $67500 * [2] + 142500 * [4] + 0.0064 * [646751] + 0.0086 * [1.91795e+06] + 0.0064 * [1.22638e+06] + 0.0086 * [1.81842e+06] + 0.0064 * [1.13647e+06] + 0.0086 * [1.68511e+06] + 0.0064 * [1.09792e+06] + 0.0086 * [1.62795e+06] + 0.0064 * [1.36919e+06] + 0.0086 * [2.03018e+06] + 0.0064 * [2.06259e+06] + 0.0086 * [3.05833e+06] + 0.0064 * [859708] + 0.0086 * [1.27474e+06] + 0.0064 * [0] + 0.0086 * [2.39744e+06] + 0.0064 * [735827] + 0.0086 * [2.18211e+06] + 0.0064 * [681883] + 0.0086 * [2.02214e+06] + 0.0064 * [1.02982e+06] + 0.0086 * [1.52697e+06] + 0.0064 * [1.36919e+06] + 0.0086 * [2.03018e+06] + 0.0064 * [1.23755e+06] + 0.0086 * [3.66999e+06] + 0.0064 * [859708] + 0.0086 * [1.27474e+06]$

Valor :  $[1.04184e+06]$

U :  $llcIntVarArray[[[1] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [0] [1] [1] [2] [2] [1] [2] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4] [4]]]$

X :  $llcIntVarArray[[[2] [4]]]$

Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (11/13)

Z[0]:[646751..646751] + [1.22638e+06..1.22638e+06] + [1.13647e+06..1.13647e+06] +  
 [1.09792e+06..1.09792e+06] + [1.36919e+06..1.36919e+06] +  
 [2.06259e+06..2.06259e+06] + [859708..859708] + [0] + [735827..735827] +  
 [681883..681883] + [1.02982e+06..1.02982e+06] + [1.36919e+06..1.36919e+06] +  
 [1.23755e+06..1.23755e+06] + [859708..859708]

Z[1]:[1.91795e+06..1.91795e+06] + [1.81842e+06..1.81842e+06] +  
 [1.68511e+06..1.68511e+06] + [1.62795e+06..1.62795e+06] +  
 [2.03018e+06..2.03018e+06] + [3.05833e+06..3.05833e+06] +  
 [1.27474e+06..1.27474e+06] + [2.39744e+06..2.39744e+06] +  
 [2.18211e+06..2.18211e+06] + [2.02214e+06..2.02214e+06] +  
 [1.52697e+06..1.52697e+06] + [2.03018e+06..2.03018e+06] +  
 [3.66999e+06..3.66999e+06] + [1.27474e+06..1.27474e+06]

E : IlcIntVarArray[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288]  
 [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]

Função Objetivo : 67500 \* [4] + 142500 \* [3] + 0.0064 \* [1.2935e+06] + 0.0086 \*  
 [1.43846e+06] + 0.0064 \* [1.83957e+06] + 0.0086 \* [1.36382e+06] + 0.0064 \*  
 [1.70471e+06] + 0.0086 \* [1.26384e+06] + 0.0064 \* [1.64688e+06] + 0.0086 \*  
 [1.22096e+06] + 0.0064 \* [2.34718e+06] + 0.0086 \* [1.30511e+06] + 0.0064 \*  
 [3.09389e+06] + 0.0086 \* [2.29374e+06] + 0.0064 \* [1.28956e+06] + 0.0086 \* [956054] +  
 0.0064 \* [1.2935e+06] + 0.0086 \* [1.43846e+06] + 0.0064 \* [1.47165e+06] + 0.0086 \*  
 [1.63658e+06] + 0.0064 \* [1.36377e+06] + 0.0086 \* [1.5166e+06] + 0.0064 \* [1.7654e+06]  
 + 0.0086 \* [981625] + 0.0064 \* [2.34718e+06] + 0.0086 \* [1.30511e+06] + 0.0064 \*  
 [3.09389e+06] + 0.0086 \* [2.29374e+06] + 0.0064 \* [1.28956e+06] + 0.0086 \* [956054]  
 Valor : [1.03462e+06]

U : IlcIntVarArray[[2] [3] [3] [3] [4] [3] [3] [2] [2] [2] [4] [4] [3] [3]  
 [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3] [3]]

X : IlcIntVarArray[[4] [3]]

Z[0]:[1.2935e+06..1.2935e+06] + [1.83957e+06..1.83957e+06] +  
 [1.70471e+06..1.70471e+06] + [1.64688e+06..1.64688e+06] +  
 [2.34718e+06..2.34718e+06] + [3.09389e+06..3.09389e+06] +  
 [1.28956e+06..1.28956e+06] + [1.2935e+06..1.2935e+06] + [1.47165e+06..1.47165e+06]  
 + [1.36377e+06..1.36377e+06] + [1.7654e+06..1.7654e+06] +  
 [2.34718e+06..2.34718e+06] + [3.09389e+06..3.09389e+06] +  
 [1.28956e+06..1.28956e+06]

Z[1]:[1.43846e+06..1.43846e+06] + [1.36382e+06..1.36382e+06] +  
 [1.26384e+06..1.26384e+06] + [1.22096e+06..1.22096e+06] +  
 [1.30511e+06..1.30511e+06] + [2.29374e+06..2.29374e+06] + [956054..956054] +  
 [1.43846e+06..1.43846e+06] + [1.63658e+06..1.63658e+06] + [1.5166e+06..1.5166e+06]  
 + [981625..981625] + [1.30511e+06..1.30511e+06] + [2.29374e+06..2.29374e+06] +  
 [956054..956054]

E : IlcIntVarArray[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288]  
 [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]

Função Objetivo : 67500 \* [5] + 142500 \* [2] + 0.0064 \* [2.15584e+06] + 0.0086 \* [799146]  
 + 0.0064 \* [2.62795e+06] + 0.0086 \* [779324] + 0.0064 \* [2.4353e+06] + 0.0086 \*  
 [722192] + 0.0064 \* [2.35269e+06] + 0.0086 \* [697693] + 0.0064 \* [2.93398e+06] +  
 0.0086 \* [870076] + 0.0064 \* [4.41984e+06] + 0.0086 \* [1.31071e+06] + 0.0064 \*  
 [1.84223e+06] + 0.0086 \* [546317] + 0.0064 \* [1.94025e+06] + 0.0086 \* [958976] +

## Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (12/13)

0.0064 \* [2.45276e+06] + 0.0086 \* [909211] + 0.0064 \* [2.27294e+06] + 0.0086 \* [842557]  
 + 0.0064 \* [2.20675e+06] + 0.0086 \* [654417] + 0.0064 \* [2.93398e+06] + 0.0086 \*  
 [870076] + 0.0064 \* [4.41984e+06] + 0.0086 \* [1.31071e+06] + 0.0064 \* [1.84223e+06] +  
 0.0086 \* [546317]

Valor : [959886]

U : IlcIntVarArrayI[[4] [5] [5] [5] [5] [5] [5] [3] [4] [4] [5] [5] [5] [5]  
 [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2] [2]]

X : IlcIntVarArrayI[[5] [2]]

Z[0]:[2.15584e+06..2.15584e+06] + [2.62795e+06..2.62795e+06] +  
 [2.4353e+06..2.4353e+06] + [2.35269e+06..2.35269e+06] + [2.93398e+06..2.93398e+06]  
 + [4.41984e+06..4.41984e+06] + [1.84223e+06..1.84223e+06] +  
 [1.94025e+06..1.94025e+06] + [2.45276e+06..2.45276e+06] +  
 [2.27294e+06..2.27294e+06] + [2.20675e+06..2.20675e+06] +  
 [2.93398e+06..2.93398e+06] + [4.41984e+06..4.41984e+06] +  
 [1.84223e+06..1.84223e+06]

Z[1]:[799146..799146] + [779324..779324] + [722192..722192] + [697693..697693] +  
 [870076..870076] + [1.31071e+06..1.31071e+06] + [546317..546317] + [958976..958976]  
 + [909211..909211] + [842557..842557] + [654417..654417] + [870076..870076] +  
 [1.31071e+06..1.31071e+06] + [546317..546317]

E : IlcIntVarArrayI[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288]  
 [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]

Função Objetivo : 67500 \* [7] + 142500 \* [1] + 0.0064 \* [2.6948e+06] + 0.0086 \* [399573]  
 + 0.0064 \* [3.15354e+06] + 0.0086 \* [389662] + 0.0064 \* [2.92236e+06] + 0.0086 \*  
 [361096] + 0.0064 \* [2.82322e+06] + 0.0086 \* [348847] + 0.0064 \* [3.59412e+06] +  
 0.0086 \* [380658] + 0.0064 \* [5.30381e+06] + 0.0086 \* [655355] + 0.0064 \* [2.25673e+06]  
 + 0.0086 \* [239014] + 0.0064 \* [2.6948e+06] + 0.0086 \* [399573] + 0.0064 \*  
 [3.15354e+06] + 0.0086 \* [389662] + 0.0064 \* [2.92236e+06] + 0.0086 \* [361096] +  
 0.0064 \* [2.70327e+06] + 0.0086 \* [286307] + 0.0064 \* [3.59412e+06] + 0.0086 \* [380658]  
 + 0.0064 \* [5.30381e+06] + 0.0086 \* [655355] + 0.0064 \* [2.25673e+06] + 0.0086 \*  
 [239014]

Valor : [952593]

U : IlcIntVarArrayI[[5] [6] [6] [6] [7] [6] [7] [5] [6] [6] [7] [7] [6] [7]  
 [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]]

X : IlcIntVarArrayI[[7] [1]]

Z[0]:[2.6948e+06..2.6948e+06] + [3.15354e+06..3.15354e+06] +  
 [2.92236e+06..2.92236e+06] + [2.82322e+06..2.82322e+06] +  
 [3.59412e+06..3.59412e+06] + [5.30381e+06..5.30381e+06] +  
 [2.25673e+06..2.25673e+06] + [2.6948e+06..2.6948e+06] + [3.15354e+06..3.15354e+06]  
 + [2.92236e+06..2.92236e+06] + [2.70327e+06..2.70327e+06] +  
 [3.59412e+06..3.59412e+06] + [5.30381e+06..5.30381e+06] +  
 [2.25673e+06..2.25673e+06]

Z[1]:[399573..399573] + [389662..389662] + [361096..361096] + [348847..348847] +  
 [380658..380658] + [655355..655355] + [239014..239014] + [399573..399573] +  
 [389662..389662] + [361096..361096] + [286307..286307] + [380658..380658] +  
 [655355..655355] + [239014..239014]

E : IlcIntVarArrayI[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288]  
 [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]

Quadro 4.1: Programa Fonte e Resultados (13/13)

Função Objetivo :  $67500 * [8] + 142500 * [0] + 0.0064 * [3.23376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.67913e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.40942e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.29376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [4.10757e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [6.18777e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [2.57912e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.23376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.67913e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.40942e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.08946e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [4.10757e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [6.18777e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [2.57912e+06] + 0.0086 * [0]$

Valor : [877771]

U :  $llcIntVarArray[[7] [8] [8] [8] [8] [8] [8] [6] [7] [7] [8] [8] [8] [8] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0]]$

X :  $llcIntVarArray[[8] [0]]$

Z[0]: $[3.23376e+06..3.23376e+06] + [3.67913e+06..3.67913e+06] + [3.40942e+06..3.40942e+06] + [3.29376e+06..3.29376e+06] + [4.10757e+06..4.10757e+06] + [6.18777e+06..6.18777e+06] + [2.57912e+06..2.57912e+06] + [3.23376e+06..3.23376e+06] + [3.67913e+06..3.67913e+06] + [3.40942e+06..3.40942e+06] + [3.08946e+06..3.08946e+06] + [4.10757e+06..4.10757e+06] + [6.18777e+06..6.18777e+06] + [2.57912e+06..2.57912e+06]$

Z[1]: $[0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0]$

E :  $llcIntVarArray[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288] [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]$

NÚMERO DE SOLUÇÕES : 6

Solução ótima :  $67500 * [8] + 142500 * [0] + 0.0064 * [3.23376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.67913e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.40942e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.29376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [4.10757e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [6.18777e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [2.57912e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.23376e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.67913e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.40942e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [3.08946e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [4.10757e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [6.18777e+06] + 0.0086 * [0] + 0.0064 * [2.57912e+06] + 0.0086 * [0]$

U :  $llcIntVarArray[[7] [8] [8] [8] [8] [8] [8] [6] [7] [7] [8] [8] [8] [8] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0] [0]]$

X :  $llcIntVarArray[[8] [0]]$

Z[0]: $[3.23376e+06..3.23376e+06] + [3.67913e+06..3.67913e+06] + [3.40942e+06..3.40942e+06] + [3.29376e+06..3.29376e+06] + [4.10757e+06..4.10757e+06] + [6.18777e+06..6.18777e+06] + [2.57912e+06..2.57912e+06] + [3.23376e+06..3.23376e+06] + [3.67913e+06..3.67913e+06] + [3.40942e+06..3.40942e+06] + [3.08946e+06..3.08946e+06] + [4.10757e+06..4.10757e+06] + [6.18777e+06..6.18777e+06] + [2.57912e+06..2.57912e+06]$

Z[1]: $[0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0] + [0]$

E :  $llcIntVarArray[[2787720] [3171666] [2939152] [2839450] [3541006] [5334288] [2223382] [2787720] [3171666] [2939152] [2663324] [3541006] [5334288] [2223382]]$

Fonte: Programa desenvolvido na PETROBRAS especificamente para esta dissertação.