

DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE HELICÓPTEROS PARA UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DE PESSOAS VOLTADO ÀS ATIVIDADES OFFSHORE DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Pedro Paulo Forain Rocha

Petrobrás S.A.

Mirian Buss Gonçalves

Departamento de Engenharia de Produção

Universidade Federal de Santa Catarina

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: uma investigação bibliográfica, onde se busca na literatura científica identificar alguns modelos matemáticos apropriados ao uso para o dimensionamento de frota, entre os quais foi selecionado 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; um estudo de caso, a partir das operações da PETROBRAS na Bacia de Campos, o qual apresentou resultados muito próximos aos obtidos pelo método empírico, atualmente praticado, validando o modelo para analisar cenários futuros.

ABSTRACT

The present paper describes the development of a mathematical model to determine the appropriate size of helicopter fleet used in the distribution of people employed in the exploration and production activities of an offshore petroleum basin, i.e., transportation to and from offshore platforms.

This paper is divided in two parts: The first is a review of the technical literature in order to identify appropriate models for this type of problem. The work of Etezadi and Beasley (1983) was selected due to its simplicity and fit with 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 model to the helicopter fleet of Campos Basin, where Petrobras has offshore operations. The results showed close alignment with the empirical approach that is currently used and validated the model for analyze future scenarios.

1. INTRODUÇÃO

Em toda atividade *offshore* 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). A seleção do modal é estabelecida de acordo com as condições geográficas e ambientais locais, associadas às distâncias envolvidas. Este trabalho, entretanto, limita-se a tratar exclusivamente do processo relativo à distribuição física de pessoas por via aérea.

Na atividade de exploração e produção de petróleo não é possível decidir sobre a localização e extensão de sua área de atuação, com base 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 (Christofer, 1997; Russel, 1998), 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* é extremamente relevante. Neste contexto, o objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo de dimensionamento de frota de helicópteros para atendimento à demanda de transporte de pessoas 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.

O trabalho é estruturado como segue: na seção 2 apresenta-se a descrição do sistema logístico objeto do estudo. A seção 3 trata do dimensionamento de frotas, descrevendo-se o modelo utilizado. A seção 4 apresenta o estudo de caso desenvolvido e, finalmente, na seção 5 são apresentadas as conclusões.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO

Nesta seção apresentam-se os principais componentes do Sistema Logístico (SL) objeto do estudo, 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, bem como as principais características de operação do sistema.

2.1. Componentes do Sistema Logístico

Os principais componentes do SL são: Aeródromos, Unidades Marítimas e Helicópteros. Aeródromo é toda a área destinada a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves, possuindo ou não, pista de rolamento, denominando-se heliporto nesse último caso.

O termo genérico Unidade Marítima (UM) é utilizado para se referir a qualquer instalação marítima voltada às funções de exploração e produção da Indústria Petrolífera. Essas unidades podem ser plataformas ou navios. As plataformas dividem-se em fixas e móveis (flutuantes e auto-eleváveis).

O terceiro componente do SL, o helicóptero, tem como característica principal, de caráter operacional, a 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). Estas características fazem com que o helicóptero não necessite de pista de rolamento para pouso ou decolagem, o que é determinante na sua seleção para operação em instalações marítimas 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. Esta variável, juntamente com a variável de distância, permite 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.

Há que se considerar, como significativa restrição para aeronaves, a sua autonomia, dado o seu elevado consumo de combustível (querosene de aviação - QAV). 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.

2.2. Operação

Em geral, por determinação do órgão regulamentador da aviação civil, 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 seis horas diárias, já descontadas 3 horas reservadas às inspeções e manutenções de rotina, planejamento dos vôos e procedimentos de embarque e desembarque de passageiros em terra, 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 voo, 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 do tipo de homologação dada ao aeródromo que está controlando as operações em questão, podendo ser IFR, para vôos por instrumento, ou VFR, para vôos visuais.

Portanto, a depender do tipo de homologação tanto da aeronave como do aeródromo, o cálculo das autonomias deve atender a 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, mais: i) durante o dia, voar em velocidade de cruzeiro mais 20 minutos, no caso de helicópteros e 30

minutos no caso de aviões. ii) à noite, voar em velocidade de 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, mais: completar o vôo até o aeródromo de destino previsto para o primeiro pouso; voar desse aeródromo até o aeródromo de alternativa; voar, depois disso, mais 30 minutos no caso de helicópteros e 45 minutos no caso de aviões.

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 vôo IFR demanda maior necessidade de combustível que o vôo VFR, isto por possuir procedimentos de vôo mais amarrados em termos de rotas, aproximação, pouso e decolagem e altitudes, que resultam em missões mais longas que quando em vôo visual. Entretanto é reconhecida a operação IFR, como a mais segura. Resta ainda esclarecer que a depender das regras de vôo serem para vôo 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 vôos.

3. Dimensionamento de frotas

O planejamento da frota é um processo de gerenciamento complexo (Couillard, 1993), que visa o ajuste do dimensionamento de uma frota que seja adequada ao atendimento a uma determinada demanda a um custo efetivo. O 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 (Das e Tyagi, 1997; Novaes, 2001), 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 e b) estacionária ou não estacionária; iii) Quanto à contratação *spot* (contratação de curto prazo) 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: i) 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*); ii) 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*).

No quadro 1 apresentam-se alguns dos principais modelos encontrados na literatura, resumindo-se as suas principais características. Salienta-se que o modelo de Etezady e Beasley (1983) é bastante abrangente no tratamento da frota e da demanda, possibilitando, mesmo que de forma aproximada, a alocação de tipos de roteiros (viagem de atendimento único e viagens de atendimento múltiplo). A seguir apresenta-se uma descrição detalhada do mesmo, que será adaptado e utilizado para modelar o sistema logístico objeto do estudo.

Quadro 1: Alguns modelos de dimensionamento de frota e suas principais características

MODEL OS	DIMENSIO- NAMENTO	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

3.1. O modelo de Etezadi e Beasley

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 centro de distribuição (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 critérios 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 ferramenta adequada 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. O modelo e suas variáveis são detalhados a seguir.

Parâmetros de entrada:

c_i Distância entre o CD 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 gasto na entrega ao cliente i no período t).

D_j Distância máxima 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:

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

Restrições :

$$u_{jt} \leq x_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$z_{jt} \leq u_{jt} D_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$w_{jt} \leq y_{jt} D_j, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m (z_{jt} + w_{jt}) = e_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt}) D_j \geq e_t + \sum_{i=1}^n d_{it}, \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt}) Q_j \geq \sum_{i=1}^n q_{it}, \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$w_{jt}, z_{jt} \geq 0, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$x_j, y_{jt}, u_{jt} \text{ inteiros}, \quad j = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

Viagens de atendimento único:

$$e_t = 2 \sum_{i=1}^n c_i, \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

Viagens de atendimento múltiplo:

$$e_t = 2c \sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt}) + d(n - \sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt})), \quad t = 1, \dots, T \quad (11)$$

onde $\sum_{j=1}^m (u_{jt} + y_{jt})$ é o número de viagens assumindo que cada veículo só faz uma viagem por período; c é a distância média entre o primeiro e o último cliente ao CD. d é a distância média entre clientes.

A expressão (1) identifica a alternativa possível de mínimo custo. (2) garante que o número de veículos próprios usados em qualquer período não excede o número total de veículos próprios. (3) e (4) garantem que as distâncias percorridas pelos veículos próprios e alugados, respectivamente, não ultrapassem suas distâncias máximas por período. (5) garante que a distância total percorrida seja igual à distância total esperada. (6) 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. (7) 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.

4. Estudo de Caso

O estudo de caso refere-se às operações de transporte de passageiros, por via aérea, da Petrobrás, na Bacia de Campos, a partir do heliporto de São Tomé, Campos, RJ, no ano de 2000. Nesse ano foram transportados em média 17.000 passageiros/mês, sendo servidas 73 UM, com uma frota de 8 helicópteros: 2 de grande porte (S-61) e 6 de médio porte (S-76A).

As taxas de afretamento praticadas são apresentadas na tabela 1 e os dados operacionais das aeronaves na tabela 2.

Tabela 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.

Tabela 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.

Observa-se que a metodologia adotada para o dimensionamento da frota é empírica, baseada na experiência dos planejadores, não garantindo a minimização dos custos. Face aos altos valores envolvidos, é relevante a utilização de um modelo que permita obter resultados rápidos, de forma a comparar configurações alternativas.

4.1. Adaptações ao Modelo de Etezady e Beasley

Conforme já citado, 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, como para viagens de atendimento múltiplo. 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 característicos das viagens de atendimento único, conforme equação (10).

Outra consideração feita sobre o modelo original é a de trabalhar-se apenas com a opção de utilização de veículos próprios (variável de resposta x_j). Muito embora a PETROBRAS só possua frota contratada 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 semelhante àquela estabelecida no algoritmo original para a modalidade de frota própria. Os helicópteros contratados 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} . Além disto, todas as variáveis e parâmetros originalmente relacionadas à frota própria, passam a se referir neste estudo de caso à frota contratada de helicópteros da PETROBRAS.

4.2. Descrição das variáveis

Visando facilitar a abordagem deste estudo de caso são adotadas algumas premissas simplificadoras sobre as variáveis que compõem o algoritmo de Etezadi e Beasley (1983), as quais são descritas a seguir e formam o conjunto de dados de entrada utilizado.

Parâmetro c_i Representa a distância entre o heliporto de São Tomé e a unidade marítima i , $i=1,2,...,73$ (73 unidades marítimas são atendidas).

Parâmetro q_{it} Representa a quantidade de passageiros a ser transportada para a unidade marítima i ($i=1,2,...,73$), no dia t ($t=1,2,...,14$). Estas quantidades compreendem apenas os valores de uma “pernada”, isto é, de ida ou de volta, já que sempre ocorrem com valores iguais ou muito próximos. Foi utilizado o período de 14 dias para a análise, pois tem-se um ciclo completo nesse intervalo (as equipes permanecem 14 dias nas unidades marítimas).

Parâmetro d_{it} Representa a distância equivalente ao tempo de embarque/desembarque de passageiros na unidade marítima i ($i=1,2,...,73$), no dia t ($t=1,2,...,14$). 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 para o S-61 e 237 km/h para o S-76).

Parâmetro D_j Representa a distância máxima 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 capacidade máxima 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 voo (17 passageiros por voo para o S-61 e 10 passageiros por voo 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).

Parâmetro F_j Representa o custo fixo do helicóptero contratado do tipo j ($j=1,2$) para $T=14$ dias. Embora as parcelas fixas dos afretamentos dos helicópteros sejam pagas pela PETROBRAS para períodos mensais, os valores considerados foram para o período de 14 dias, que caracteriza o ciclo completo da demanda, 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 contratado do tipo j ($j=1,2$) por km percorrido. Apesar das parcelas variáveis dos helicópteros contratados serem pagas pela PETROBRAS por hora de voo, foi 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.

4.3. Implementação do Modelo

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. Este *software* 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:

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++. Para resolver o problema foi desenvolvido um programa fonte em C++, subdividido em seus dois módulos citados acima, compreendendo: função objetivo, variáveis de entrada, restrições e soluções.

4.4. Resultados e Análise

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, as soluções surpreendem pela proximidade de seus resultados, já que o método 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 métodos empíricos normalmente conduzem a boas soluções, mas não necessariamente a melhor.

Estes resultados mais do que surpreendentes pelos seus valores, revelam as potencialidades da modelagem desenvolvida, que do ponto de vista do planejamento conferem grande agilidade

para tomadas de decisão, por possibilitar análises do tipo “What if?” em situações frequentes de mudanças de cenários, decorrentes de variações na demanda, variações de preços de helicópteros, dos tipos dos helicópteros e, conseqüentemente, de suas características operacionais, etc.

5. CONCLUSÕES

A partir da modelagem desenvolvida, vislumbram-se, além dos limites do resultado deste trabalho do ponto de vista acadêmico ou científico, oportunidades imediatas de sua aplicação, quanto aos aspectos econômicos e de negócios, bastante significativas, pela sua potencialidade de 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), adaptado ao estudo de caso apresentado, permite de forma rápida e sem praticamente custo algum efetuar análises do tipo “ what if?”, que possibilitam analisar diversos cenários futuros, sem, necessariamente, realizar 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chistofer T. (1997) *The Development of a Simulation Technique for the Analysis of Helicopter Offshore Operation*, University of Glasgow, Escócia.
- Couillard J. (1993) A Decision Support System for Vehicle Fleet Planning, *Decision Support Systems* V.9. N.2 p 149 – 159.
- Das, C. e Tyagi, R. (1997) Role of inventory and transportation costs in determining the optimal degree of centralization. *Transportation Research E* , vol.33, 171-179.
- Etezadi T. , And Beasley J. E. (1983) Vehicle Feet Composition. *Journal of Operational Research Society* 34, p. 87-91.
- Gould J. (1969) The Size and Composition of a Road Transportation fleet. *Operational Research Quarterly* 20, p.81-92.
- Kirby P. (1959) Is Your Fleet the Right Size?. *Operational Research Quarterly* 10, p.252, 1959.
- Mole R. H. (1975) Dynamic Optimization of Vehicle Fleet Size. *Operational Research Quarterly* 26, p.25-34, 1975.
- Novaes A. G. (2001) *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Ed.Campus, São Paulo.
- Parikh S. C. (1977) On a Fleet Sizing Problem and Allocation Problem. *Management Science* 23, N.9, p.972-977, 1977.
- Russel G.R. (1998) *Offshore Helicopter Operations*. Oilfield Ledburg, Inglaterra.
- Wyatt J. K. (1961) – Optimal Fleet Size. *Operational Research Quarterly* 12, p.186-187.

Pedro Paulo Forain Rocha

Petrobras S.A.

forain@petrobras.com.br

Mirian Buss Gonçalves

Departamento de Engenharia de Produção – UFSC

mirianbuss@deps.ufsc.br