



Filipe Machado Heringer

**Estratégias de redução de custos nas
operações de transporte aéreo offshore**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
Agosto de 2020



Filipe Machado Heringer

**Estratégias de redução de custos nas
operações de transporte aéreo offshore**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rafael Martinelli Pinto

Professor e Orientador
Departamento de Engenharia Industrial – PUC Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior

Instituto Militar de Engenharia – IME

Prof. Túlio Angelo Machado Toffolo

Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Rio de Janeiro, 18 de Agosto de 2020

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Filipe Machado Heringer

Graduou-se em Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Aeronáutica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2007. Iniciou suas atividades profissionais em 2008 na Petrobras, onde trabalha até os dias de hoje. Atualmente, desempenha suas funções como gestor do segmento de Transporte Aéreo Offshore, na gerência geral da Logística Offshore.

Ficha Catalográfica

Heringer, Filipe Machado

Estratégias de redução de custos nas operações de transporte aéreo offshore / Filipe Machado Heringer ; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – 2020.

82 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Logística. 3. Pesquisa Operacional. 4. Aviação Offshore. 5. Helicópteros. 6. Problema da Mochila. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela salvação, pelas vidas que me deu - sim, a efêmera e a eterna - e tudo que nelas incluiu com muito amor: família, saúde, amigos, trabalho, sustento, desafios, capacidades, suporte e motivação.

Agradeço à minha amada esposa Luina, pelo incentivo, companheirismo, cumplicidade, paciência e outras tantas qualidades que minhas palavras não conseguiriam jamais expressar. À Júlia e Isabela, que coloriram meu mundo, que agora são a principal razão do meu compromisso e seriedade na batalha diária e que materializam em mim a necessidade de lutar por um mundo melhor para que vivam abundantemente.

Aos meus pais e avós, que com seus exemplos e de diferentes formas, me ensinaram que esforço, dedicação, cuidado, paciência, humildade, honestidade e amor são fundamentais para o alcance dos objetivos relevantes da vida.

À Petrobras, por incentivar que seus funcionários continuem aprimorando seus conhecimentos e por ter patrocinado o presente estudo. Aos meus gestores que, cada um a seu momento, confiaram a mim esta oportunidade e acreditaram que eu seria capaz de proporcionar retorno à empresa tanto no aprimoramento da competência técnica quando no desempenho econômico de suas operações logísticas.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, que contribuíram com ideias, argumentos, contrapontos, críticas, informações técnicas, e que principalmente me ajudaram a não deixar este estudo residir solitário nas páginas que se seguem, mas que o transformaram em realidade na operação da Petrobras.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Martinelli, pela paciência, parceria, e pelas valiosas sugestões e boa vontade de ajudar em todos os aspectos que envolveram a elaboração desta dissertação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que escreveram os artigos científicos e que desenvolveram as ideias, ferramentas e técnicas que me auxiliaram na construção deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Heringer, Filipe Machado; Martinelli, Rafael (Orientador). **Estratégias de redução de custos nas operações de transporte aéreo offshore**. Rio de Janeiro, 2020. 82p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um importante ramo do estudo de logística é aquele que se preocupa com a otimização da eficiência do uso de recursos de transporte. No segmento de aviação da Petrobras, que transporta cerca de 20% de todos os passageiros offshore do planeta, otimizações são bastante significativas e podem gerar importantes benefícios econômicos (menor custo total), logísticos (maior disponibilidade de recursos), ambientais (menores emissões de gases poluentes) e de segurança (menor exposição aos riscos da atividade).

Por estes motivos, é imperativo que se busque formas de aumentar a eficiência do uso das aeronaves contratadas, maximizando sua utilização dentro de limites permitidos por normas de voo offshore, limites de fadiga de tripulantes, limites operacionais dos aeroportos de origem e destino, além de limites de capacidades de cada aeronave.

Neste sentido, o objetivo deste estudo é apresentar o desenvolvimento de soluções para redução dos custos da operação aérea, buscando o máximo aproveitamento das aeronaves contratadas, a partir de uma proposta de otimização da programação de voos através da resolução de um problema de programação de Programação Linear Inteira, que estende um Problema de Múltiplas Mochilas, respeitando as limitações impostas por regulamentação e necessidades operacionais.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional e os resultados obtidos a partir deste trabalho foram implementados nas operações da Petrobras e fazem parte do Plano de Resiliência desta empresa. Os ganhos econômicos obtidos representam uma redução de R\$ 100 milhões no quinquênio do Plano de Negócios e Gestão 2020-2024, o que comprova o benefício das soluções implementadas.

Palavras-chave

Logística; Aviação Offshore; Pesquisa Operacional; Helicópteros; Problema da Mochila.

Abstract

Heringer, Filipe Machado; Martinelli, Rafael (Advisor). **Cost reduction strategies in offshore air transport operations**. Rio de Janeiro, 2020. 82p. Master's Dissertation - Department of Industrial Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

An important field of the logistics study is one that is concerned with optimizing the efficiency of the use of transport resources. In Petrobras' aviation segment, which transports about 20% of all offshore passengers worldwide, optimizations are quite significant and can generate important economic (lower total cost), logistical (increased availability of resources), environmental (lower emissions of polluting gases) and safety (reduced exposure to the risks of the activity) benefits.

For these reasons, it is imperative to seek ways to increase efficiency in the use of contracted aircrafts, maximizing their use within the boundaries imposed by offshore flight rules, crew fatigue restrictions, operational restrictions of the origin and destination airports, in addition to capacity limits for each aircraft.

Hereupon, the objective of this study is to present the development of solutions to reduce the costs of aerial operation, seeking the maximum use of contracted aircrafts, based on a proposal to optimize the flight schedule through the resolution of an Integer Linear Programming formulation that extends a Multiple Knapsack Problem, but within the boundaries imposed by regulations and operational needs.

A computational tool was developed and results obtained from this work were implemented in Petrobras' operations, and are part of this company's Resilience Plan. The economic gains obtained represent a reduction of USD 27 million in the five-year period of the 2020-2024 Business Plan, which proves the benefit of the implemented solutions.

Keywords

Logistics; Offshore Aviation; Operational Research; Helicopters; Knapsack Problem.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Composição do sistema logístico aéreo	14
1.2	Relevância mundial do transporte aéreo da Petrobras.....	16
1.3	Região de interesse deste trabalho	17
1.4	Tipos de demanda do transporte aéreo offshore	17
1.5	Situação antes da realização deste trabalho	20
1.6	Motivação	22
1.7	Objetivos	23
1.8	Estrutura da dissertação.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	Níveis do Planejamento Logístico	25
2.2	Planejamento de helicópteros offshore	27
2.3	Problema da Mochila.....	28
2.4	Problema da Mochila com repetições	31
2.5	Problema das Múltiplas Mochilas	31
2.6	Problema da Soma de Subconjunto	33
2.7	Problema da Soma de Múltiplos Subconjuntos.....	33
2.8	Variantes adicionais.....	34
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Composição dos custos da operação	35
3.2	Estratégias para redução do custo variável.....	36
3.2.1	O uso das mediatrizes para escolha de aeroportos.....	37
3.3	Estratégias para redução do custo fixo	40
3.4	Mapeamento para o problema da literatura	40
4	APLICAÇÃO	45
4.1	Missão típica	45
4.2	Restrições operacionais	46
4.3	Representação gráfica da programação	48
4.4	Um exemplo do replanejamento de tabela de voo	52
5	RESULTADOS	56
5.1	Ferramenta elaborada e testes realizados	56
5.2	Necessidades e Oportunidades identificadas	58
5.3	Soluções implementadas no processo de planejamento	62
5.3.1	Antecipação de decolagens e sequência de lançamentos..	62
5.3.2	Aumento da frequência de revisões de tabelas	64
5.3.3	Revisão do modelo matemático para recuperação de voo .	65
5.3.4	Redistribuição dos <i>slots</i> livres em diferentes bases	66
5.3.5	Revisão da alocação dos <i>slots</i> livres	67
5.3.6	Ordenação dos voos como função da previsibilidade	69

5.3.7	Definição dos tempos de <i>slots</i> na visão probabilística	72
5.4	Esquemático das soluções implementadas.....	74
6	CONCLUSÃO.....	76
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

Lista de siglas

E&P	Exploração e Produção
PLSV	Pipeline Laying Support Vessel
DSV	<i>Diving Support Vessel</i>
RSV	<i>Remote Operated Vehicle Support Vessel</i>
IOGP	<i>International Oil and Gas Producers</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
PDAD	Pedidos de Desembarques de Acidentados ou Doentes
EVAM	Evacuação Aeromédica
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ICA	Instrução do Comando da Aeronáutica
HMP	Helicóptero de Médio Porte
HGP	Helicóptero de Grande Porte
SBFS	Heliponto do Farol de São Tomé
OTD	<i>On Time Departure</i>
UEP	Unidade Estacionária de Produção
UMS	Unidade de Manutenção e Serviços

Lista de figuras

Figura 1 - Distribuição percentual de operação das bases aeroportuárias	17
Figura 2 - Distribuição percentual da demanda da operação aérea	20
Figura 3 - Visão geral das unidades marítimas atendidas e bases aéreas utilizadas	21
Figura 4 - Regiões preferenciais de atendimento, excluindo São Tomé.	22
Figura 5 – Hierarquia do planejamento logístico aplicada ao transporte aéreo offshore	25
Figura 6 – Ilustração do Problema da Mochila Binária (KP01).	29
Figura 7 – Ilustração do Problema de Múltiplas Mochilas (MKP)	32
Figura 8 - Composição de custos fixos e variáveis em função das horas voadas.....	36
Figura 9 - Ilustração da propriedade da mediatriz	37
Figura 10 - Problema de alocação de facilidades simplificado com uso de mediatrizes.....	38
Figura 11 - Exemplo de alocação ótima de facilidades para uma aplicação offshore	39
Figura 12 - Uso de mediatrizes na região da Bacia de Campos.....	39
Figura 13 - Composição de tempos para o cumprimento de uma missão.	46
Figura 14 - Nascer e pôr do sol em Farol de São Tomé (SBFS)	48
Figura 15 - Representação gráfica de uma solução viável do problema	49
Figura 16 - Visualização por representação gráfica – ineficiências visíveis	51
Figura 17 - Versão final da visualização da programação – ociosidades minimizadas	52
Figura 18 - Programação original – 31 voos alocados em 10 helicópteros	53
Figura 19 - Programação revisada – 38 voos alocados em 8 helicópteros	54
Figura 20 - Programação final após ajustes – 41 voos alocados em 10 helicópteros.....	55
Figura 21 – Estudo do tempo gasto no cálculo no resultado obtido	57
Figura 22 - Ilustração do efeito das pequenas variações nos horários planejados.....	61
Figura 23 - Encadeamento do fluxo de desenvolvimento do trabalho	62
Figura 24 - Programação contendo slots livres espalhados e aeronaves de pool	68
Figura 25 - Programação revisada com slots realocados sem aeronaves em pool	68
Figura 26 - Comparação da perda da capacidade de recuperação ao longo do dia.....	69

Figura 27 – Sugestão de sequenciamento em função do tipo de unidade	71
Figura 28 – Histograma de distribuição de tempos de voo.....	73
Figura 29 – Encadeamento das ideias para a proposição das soluções.	74
Figura 30 – Encadeamento das ideias para a proposição das soluções.	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Representatividade da Petrobras na aviação Offshore internacional.....	16
Tabela 2 - Distribuição das demandas determinísticas e probabilísticas no ano 2019	19
Tabela 3 - Níveis de planejamento para a operação do transporte aéreo offshore	26
Tabela 4 – Comparativo do MKP padrão e do Problema em questão	42
Tabela 5 – Modelo tradicional de edição da programação, chamado de “tabela vertical”	49
Tabela 6 – Modelo de Visualização da programação, chamado de “tabela visual”	50
Tabela 7 – Detalhamento dos ganhos de ampliação de janela em cada helicóptero.....	63
Tabela 8 – Efeitos na programação em função da mudança de posição	71

1

Introdução

Na indústria do petróleo, o segmento de E&P (Exploração e Produção) congrega as atividades de exploração de novas jazidas de petróleo além das atividades de produção e tratamento de óleo e gás natural. Na Petrobras, grande parte de suas atividades estão concentradas em ambiente offshore. Por este motivo, as unidades de perfuração de poços, conhecidas como sondas, e as unidades de produção, conhecidas como plataformas, são grandes unidades marítimas que passam a maior parte de sua vida útil em alto mar, sem sequer retornar para um porto.

Além destas unidades, há também uma vasta variedade de navios de suporte para as atividades em alto mar, dentre os quais podemos citar as embarcações especiais de lançamento de dutos, conhecidos como PLSVs (*Pipeline Laying Support Vessels*), os barcos de mergulho saturado, conhecidos como DSVs (*Diving Support Vessels*), as embarcações de suporte remoto às operações submarinas, chamadas de RSVs (*Remote Operated Vehicle Support Vessels*), além de navios sísmicos e balsas de instalação de equipamentos.

Por esta razão, existe a necessidade de uma enorme cadeia logística para suprir demandas operacionais e habitacionais nestas unidades marítimas. Esta rede logística é composta por portos, aeroportos, armazéns, caminhões, barcos, navios, helicópteros, dentre outros recursos para manter o suprimento a bordo e as condições de habitabilidade das plataformas, sondas e navios.

Dentre as cargas transportadas podemos citar o ferramental utilizado nas atividades de perfuração como *drillpipe risers*, equipamentos submarinos, consumíveis utilizados na construção de poços e no controle de parâmetros de reservatórios, além de uma grande variedade de produtos químicos para o controle da estabilidade das plantas de processo.

Além do suprimento de equipamentos e consumíveis para a realização das operações offshore, são transportados materiais necessários à sobrevivência humana neste ambiente, como alimentos, água, medicamentos, equipamentos de proteção, além das facilidades de hotelaria.

Todas as cargas mencionadas são transportadas normalmente por

embarcações de suporte logístico, devido ao baixo custo do modal marítimo em comparação ao modal aéreo em helicópteros. No entanto, na Petrobras não são utilizadas embarcações como meio de transporte de sua força de trabalho para as unidades marítimas, salvo raras exceções. Isto se deve ao fato de ser um meio de transporte lento e bastante incômodo para os passageiros, além das dificuldades de atracação em várias unidades marítimas de grande porte.

Assim, a Petrobras opta pelo transporte aéreo offshore, utilizando-se de uma frota de helicópteros para suprir as plataformas de trabalhadores, bagagens e pequenas cargas para a realização de suas atividades. Atualmente, ela conta com uma frota de 50 helicópteros espalhados por 11 bases aéreas na costa brasileira.

1.1

Composição do sistema logístico aéreo

O sistema logístico onde se inserem as atividades do transporte aéreo offshore é composto por 11 bases aéreas distribuídas ao longo da costa brasileira, 50 helicópteros e cerca de 150 unidades marítimas. São utilizados desde helipontos pequenos, como as operações no Rio Grande do Norte e Ceará, até aeroportos homologados para operação internacional, como os aeroportos de Cabo Frio e Navegantes.

Quanto às aeronaves, é possível dividi-las em três diferentes portes. Os helicópteros de pequeno porte (HPP) são capazes de transportar 5 passageiros simultaneamente. Nesta categoria pode-se citar o modelo EC-135 da fabricante *Airbus Helicopters*. Os HPPs são minoria na frota e são utilizados exclusivamente nas unidades marítimas do Rio Grande do Norte e Ceará, que possuem limitação em seus *helidecks* para aeronaves deste porte.

Os helicópteros de médio porte (HMP) são muito utilizados na aviação offshore. Possuem doze assentos para transporte de passageiros, e os principais modelos em uso atualmente são os AW-139 da fabricante *Leonardo Helicopters* e os S-76C⁺⁺ da fabricante *Sikorsky*. Quanto às aeronaves de grande porte (HGP), possuem capacidade para transporte de 19 pessoas na cabine de passageiros. O único exemplar em uso deste modelo na maioria das empresas de óleo e gás é o helicóptero S-92A, do fabricante *Sikorsky*.

Com relação às unidades marítimas, é possível categorizá-las em função do

trabalho principal executado no ambiente offshore. Este tipo de categorização é relevante para fins deste estudo pois conferem características mais estacionárias ou mais nômades a cada uma delas, o que interfere diretamente com a questão da logística de pessoas e cargas. Ao mudarem de coordenadas para a realização de um novo serviço, é necessário que a solução logística seja revisada para manter níveis adequados de custos e tempos de atendimento.

As unidades que produzem petróleo e gás natural e fazem os primeiros tratamentos de retirada de areia, separação de água e demais compostos como CO₂ e H₂S, são chamadas de Unidades estacionárias de Produção (UEP) ou simplesmente de plataformas de produção. Normalmente são afixadas no leito marinho por meio de estruturas de ancoragem, o que as confere uma condição de perenidade com relação à posição geográfica, permanecendo na mesma posição ao longo de décadas. São poucas as exceções, mas há plataformas de produção com características mais nômades, que produzem um volume reduzido de petróleo em certo campo para coletar dados de pressão, vazão e características do reservatório para auxiliar no desenvolvimento de soluções definitivas de produção. Estas unidades mantêm posição por cerca de seis meses a um ano.

As UEPs por vezes demandam grandes serviços de manutenção e paradas de produção, e este tipo de serviço demanda grande quantidade de pessoal a bordo. Para comportar tamanho efetivo e concluir com agilidade as paradas de manutenção, são posicionadas Unidades de Manutenção e Serviços (UMS) ao lado das plataformas de produção para alojar as equipes excedentes para a realização dos trabalhos. Este tipo de unidade demanda grande capacidade de transporte de pessoas e mantém posição da ordem de um semestre, até que sejam deslocadas para atender outra plataforma.

Outro tipo de unidade marítima demandante de transporte aéreo são as chamadas sondas de perfuração e completação. São responsáveis por perfurar, construir e equipar (é chamado de completar) os poços de petróleo. Também realizam intervenções nos poços que apresentarem alguma necessidade de manutenção. Este tipo de atividade confere às sondas uma característica de manutenção de posição por cerca de sessenta a noventa dias, até que seja realocada para realizar novo serviço em outro poço. É comum também que realizem trabalhos em poços adjacentes, permanecendo por mais tempo na mesma região geográfica.

De porte reduzido com relação às plataformas, sondas e UMSs, mas ainda

demandantes de transporte de pessoal em ambiente offshore, é possível citar os navios de lançamento de dutos (PLSV), além das embarcações de mergulho (DSV) e serviços submarinos assistidos por robôs (RSV). Estas embarcações, comumente chamadas de embarcações especiais, mantêm posição por cerca de poucos dias, e podem se mover rapidamente de um campo a outro, alterando completamente a base de atendimento preferencial.

1.2

Relevância mundial do transporte aéreo da Petrobras

É importante destacar que esta atividade é bastante representativa em termos logísticos. Nos últimos 6 anos, a Petrobras transportou em média mais de 1 milhão de passageiros anualmente para suprir seus postos de trabalho em alto mar. De acordo com os dados publicados pela *International Association of Oil & Gas Producers* (IOGP, 2019), tal quantidade representa mais de 20% do total de passageiros transportados no planeta no segmento offshore, considerando as operações realizadas em mais de 60 países por cerca de 30 empresas representadas pela IOGP. A partir destes dados, mostrados na Tabela 1 é possível perceber que a atividade aérea é bastante relevante em termos de custos logísticos.

Tabela 1 – Representatividade da Petrobras na aviação Offshore internacional

Ano	Passageiros IOGP	Passageiros Petrobras	Percentual Petrobras/IOGP
2018	4.540.105	917.046	20%
2017	4.341.024	951.229	22%
2016	4.552.202	1.028.009	23%
2015	5.792.317	1.187.394	20%
2014	5.854.769	1.239.645	21%
2013	5.207.938	1.090.130	21%
Média anual	5.048.059	1.068.909	21%

Fonte: IOGP *Safety Performance Indicators – Aviation - 2013-2018 data* (2019).

1.3

Região de interesse deste trabalho

As unidades marítimas atendidas pelo transporte aéreo da Petrobras estão espalhadas ao longo da costa brasileira, o que demanda a utilização de vários aeroportos e heliportos no Brasil. No entanto, a região do norte do estado do Rio de Janeiro concentra o maior volume de operações deste tipo e são utilizados três bases aéreas para o atendimento desta demanda, a saber, Aeroporto de Macaé, Aeroporto de Campos e Heliporto de Farol de São Tomé.

Conforme distribuição apresentada na Figura 1, as três bases aéreas da região norte fluminense congregam cerca de 61% de todos os passageiros transportados pela Petrobras no ano de 2019.

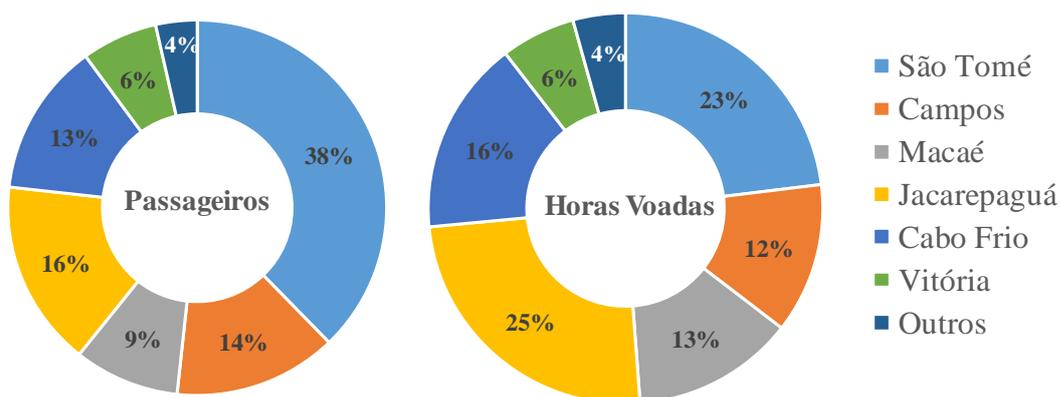


Figura 1 - Distribuição percentual de operação das bases aeroportuárias

Fonte: Compilação de dados PETROBRAS (2019).

Fazendo novamente uma comparação com os números publicados pela IOGP, disponíveis na Tabela 1, percebe-se que nestas três bases aéreas são transportados cerca de 12% de todos os passageiros *offshore* do planeta (IOGP, 2019). Com relevância mundial e obviamente para as atividades logísticas da Petrobras, as operações aéreas realizadas nos aeroportos de Macaé, Campos e Heliporto de Farol de São Tomé serão o objeto de estudo do presente trabalho.

1.4

Tipos de demanda do transporte aéreo offshore

A demanda total do transporte aéreo offshore pode ser dividida em duas

categorias: a demanda determinística, que compreende as operações rotineiras, e a demanda probabilística, que inclui as necessidades operacionais intempestivas.

Entende-se por demanda determinística aquela em que há um horário predefinido e acordado entre o transporte aéreo, a unidade marítima e passageiros. Este é o caso dos voos chamados de “trocas de turmas”, que possuem como característica principal a previsibilidade da demanda e do atendimento nos dias e horários predefinidos.

Por outro lado, a demanda probabilística é aquela em que é possível acontecer dentro de certos limites de previsibilidade, mas que não possui uma definição de horários e datas com muita antecedência. Dentre estas, é possível destacar os voos chamados de “extras”, que normalmente atendem a pedidos de embarques ou desembarques avulsos para o atendimento de demandas não planejadas, dentre as quais destacam-se os casos de embarque de profissionais para a realização de um trabalho não rotineiro a bordo, ou até mesmo uma necessidade de desembarque para suporte à família do trabalhador para o caso de alguma situação grave em terra.

Além dos voos extras, também são enquadrados como demandas probabilísticas os chamados “voos de comitivas”. Tais operações podem ser tanto para embarques de equipes de gestores administrativos para realização de visitas a bordo ou mesmo equipes de órgãos fiscalizadores como ANP, Marinha, IBAMA, dentre outros.

Pode ser que em determinadas situações excepcionais de demandas probabilísticas seja necessário utilizar um número maior de helicópteros do que o disponível em determinada base. Neste caso é necessário trasladar algum helicóptero que esteja disponível em outro aeroporto, mesmo sem transportar passageiros. Este tipo de movimento, chamado de “voo de traslado” normalmente está associado à demanda probabilística.

Além dos voos de traslado há outro tipo de demanda de voos sem o transporte de passageiros associados. São os chamados “sobrevoo ambientais”, onde um especialista em detecção e identificação de manchas de óleo vai a bordo da aeronave para avaliar possíveis impactos ambientais e coletar informações que possam ser úteis numa eventual ação de combate à poluição.

Para os casos relacionados à saúde e bem-estar dos trabalhadores, há os chamados “voos de PDAD” (Pedidos de Desembarques de Acidentados ou Doentes), que são demandados em decorrência de alguma doença ou mal-estar do

empregado embarcado. Nos casos mais graves de saúde ou emergências acidentais, são necessários “voos de resgate aeromédico”, em que uma aeronave dedicada em prontidão irá buscar o trabalhador embarcado que necessite de cuidados médicos urgentes. Nestes casos, a missão de resgate é acompanhada por uma equipe médica a bordo do helicóptero, o qual é chamado de helicóptero ambulância.

A Norma Regulamentadora NR-37 do Ministério do Trabalho menciona este tipo de atividade como Evacuação Aeromédica (EVAM), onde há o desembarque e remoção do trabalhador para unidade de saúde em terra, no caso de necessidade de cuidados médicos complementares (MTB, 2018). É relevante salientar que, diferentemente dos demais tipos de voos offshore, os voos de resgate aeromédico possuem autorização para operar também durante o período noturno, o que é proibido para os demais (DECEA, 2018). Será visto adiante que esta menção é relevante para a compreensão dos limites temporais impostos aos voos de rotina, foco deste trabalho.

A Tabela 2 mostra o detalhamento da quantidade de horas voadas e decolagens realizadas no ano 2019 em cada tipo de voo.

Tabela 2 - Distribuição das demandas determinísticas e probabilísticas no ano 2019

Demanda	Tipo	Horas voadas	Decolagens
Determinística	Voos de Troca de turma	60583:49:00	80.463
	Voos Extras	3256:13:00	4.463
	Voos de Comitivas	2811:29:00	3.447
Probabilística	Traslados e sobrevoos	1949:37:00	2.708
	PDAD	372:55:00	707
	Resgate aeromédico	352:44:00	395
Total		69326:47:00	92.183

Fonte: Compilação de dados PETROBRAS (2019).

A partir dos dados disponíveis na Tabela 2 foram consolidadas todas as decolagens e horas voadas dos voos do tipo demanda probabilística e determinística. Os resultados desta comparação são apresentados na Figura 2.

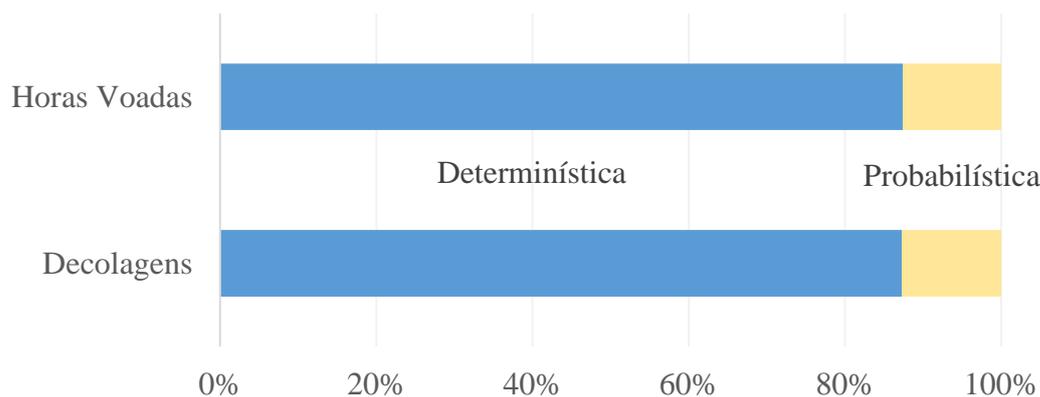


Figura 2 - Distribuição percentual da demanda da operação aérea
Fonte: O autor (2020)

A partir da comparação mostrada no gráfico da Figura 2 é possível perceber que cerca de 87% da demanda de voos no transporte aéreo offshore é relativa à demanda determinística, ou seja, aquela com horários e datas predefinidos.

Em função da natureza previsível da demanda determinística e do alto volume de operações aéreas associadas, é em cima deste tipo de demanda que este trabalho foi construído e é ela que se pretende otimizar.

1.5

Situação antes da realização deste trabalho

A distribuição de passageiros transportados a partir de cada base aeroportuária depende de fatores como demanda e posição geográfica das unidades marítimas, além das capacidades e limitações de cada aeroporto. Dentre estas, podemos citar: capacidade de processamento de passageiros nos canais de *check-in* e embarque, capacidade de pátio para receber as aeronaves incluindo dimensões e quantidades, capacidade de estoque de combustível, além da capacidade de hangaragem de aeronaves para a realização das manutenções preventivas e corretivas.

Apesar da operação aérea contar com onze aeroportos no momento do início deste trabalho, conforme foi visto na seção 1.3, o estudo em questão está focado na região da Baía de Campos. Quanto ao atendimento logístico aéreo, as unidades marítimas que atuam na Baía de Campos são atendidas majoritariamente por três bases aéreas localizadas na região norte fluminense. Tais aeroportos são o

Aeroporto de Macaé, o Aeroporto de Campos e Heliporto de Farol de São Tomé.

Na Figura 3 é possível visualizar a distribuição geográfica destas três bases aéreas além da disposição das unidades marítimas atendidas. Conforme foi visto na seção 1.1, em função da movimentação de algumas unidades marítimas cabe destacar que esta imagem ilustra a distribuição na data do início dos estudos. A Figura 3 também permite visualizar a preponderância do heliporto de São Tomé em termos de proximidade com relação às unidades marítimas.



Figura 3 - Visão geral das unidades marítimas atendidas e bases aéreas utilizadas

Fonte: Base de dados Petrobras (GISSUB), acessada em 15/06/2019

O Heliporto de Farol de São Tomé possui apenas um hangar, o que acarreta uma limitação de apenas uma empresa aérea a operar naquela localidade. Possui também apenas um local para pousos e decolagens, o que demanda que haja um intervalo mínimo de tempo entre decolagens. Outra limitação importante é que ele possui em seu pátio sete posições disponíveis para helicópteros de grande e médio porte (HGP) e três posições exclusivas para helicópteros de médio porte (HMP). Por ser um aeroporto muito bem localizado, que possibilita o atendimento logístico com menor quantidade de horas voadas e conseqüentemente menores custos de voo e combustível, a Petrobras operava no que se acreditava ser a capacidade máxima daquela base aérea. Para tal, ocupava todas as posições disponíveis, operando com sete helicópteros do modelo S-92, do fabricante *Sikorsky*, além de três helicópteros do modelo AW-139, do fabricante Leonardo *Helicopters*.

O Aeroporto de Campos dos Goytacazes contava com uma frota de cinco helicópteros, sendo dois de grande porte, modelo S-92, e três de médio porte, modelo AW-139. Sem considerar o heliporto de São Tomé, é uma localidade interessante para grande parte da operação de troca de turmas, conforme pode ser percebido através da Figura 4. No entanto o aeroporto de Campos não demanda operações probabilísticas.



Figura 4 - Regiões preferenciais de atendimento, excluindo São Tomé.
Fonte: Base de dados Petrobras (GISSUB), acessada em 15/06/2019

O Aeroporto de Macaé contava com uma frota de sete helicópteros de médio porte, do modelo AW-139. Trata-se de uma base estratégica, muito utilizada para voos de comitivas e transportes especiais, o que a torna extremamente relevante para o cenário operacional de voos probabilísticos. No entanto, sua utilização para voos de trocas de turma é mais restrita, dada a distância à maioria das plataformas.

1.6

Motivação

A relevância das operações de transporte de passageiros offshore da Petrobras, o alto volume de recursos empregados como frota de helicópteros, aeroportos e equipes, além do uso intensivo de capital constituem a motivação para a busca por uma solução de logística aérea otimizada, visando reduzir os custos

envolvidos nesta atividade, porém mantendo-se inalterados ou melhorados os níveis de serviço e capacidades de recuperação de voos.

1.7

Objetivos

O objetivo principal deste estudo é apresentar o desenvolvimento de soluções para redução dos custos da operação aérea, buscando o máximo aproveitamento das aeronaves contratadas, a partir de uma proposta de otimização da programação de voos através da resolução de uma formulação de Programação Linear Inteira, que estende um Problema de Múltiplas Mochilas, respeitando as limitações impostas por regulamentação e necessidades operacionais.

Pelo fato de o Heliporto de Farol de São Tomé possuir a localização mais privilegiada para os atendimentos offshore e também por estar operando em sua capacidade máxima no que diz respeito à quantidade de aeronaves, optou-se por buscar a maximização do uso dos helicópteros disponíveis, atendendo a maior quantidade de unidades marítimas possível, no entanto sem considerar a inclusão de novos helicópteros por limitações de pátio e hangares. O desafio então seria aumentar a quantidade de voos diários na base, maximizando o uso tanto do heliporto quanto dos helicópteros disponíveis, além de todos os demais recursos empregados como equipes de manutenção, suporte de pista, inspeção de bagagens etc. Neste sentido, o objetivo secundário é descrever o processo de otimização das tabelas de voo do Heliporto de Farol de São Tomé, alocando nesta base a maior quantidade possível de voos diários, porém mantendo capacidade de recuperação da operação diante de eventos não planejados. Esta otimização permitirá reduzir a quantidade de voos em locais que demandam voos mais longos, como os aeroportos de Campos e Macaé, reduzindo as quantidades de horas voadas totais, o que levará à redução do custo total desta operação.

É importante ressaltar que todas as mudanças devem sempre respeitar as restrições impostas por normas e pelas capacidades técnicas do heliporto, além de manter uma capacidade de recuperação de voos suficiente para comportar possíveis atrasos ou cancelamentos de voos.

1.8

Estrutura da dissertação

O conteúdo desta dissertação está disposto da seguinte maneira: no capítulo 2, consta uma breve revisão da literatura sobre níveis de planejamento logístico, problema da mochila e suas principais variantes descritas na literatura. O capítulo 3 consiste na análise da composição dos custos da operação de transporte aéreo offshore e diferentes abordagens utilizadas em estudos recentes para sua redução. Ainda neste é apresentada a metodologia utilizada na modelagem matemática para a busca de soluções ótimas na geração das tabelas de voo utilizando o problema da mochila. No capítulo 4 é apresentado o detalhamento das missões típicas da atividade do transporte aéreo offshore, além das restrições impostas à operação. Neste mesmo capítulo também são apresentados os benefícios da utilização de uma representação gráfica da solução do problema além do exemplo de uma revisão de tabela de voo utilizando a metodologia proposta. No capítulo 5 são apresentadas as necessidades e oportunidades que surgiram no processo de planejamento de tabelas de voo, além dos detalhes das soluções encontradas em proveito de cada uma delas. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos relacionados a este tema.

2

Referencial teórico

Para a construção do referencial teórico fundamental para a elaboração deste trabalho foram considerados os níveis de planejamento logístico e aplicações na operação de transporte aéreo offshore, além do problema da mochila e suas principais variantes.

2.1

Níveis do Planejamento Logístico

O planejamento logístico, assim como qualquer outro tipo de planejamento, pode ser elaborado em três diferentes níveis: estratégico, tático e operacional. O horizonte temporal talvez seja a diferença mais notável entre os três níveis. No entanto, é importante salientar que cada nível de planejamento busca responder diferentes perguntas e atacar diferentes problemas da organização, em momentos distintos.

Na operação de transporte aéreo offshore é possível destacar as principais perguntas para as quais cada nível de planejamento pretende obter respostas, conforme hierarquia apresentada na Figura 5.

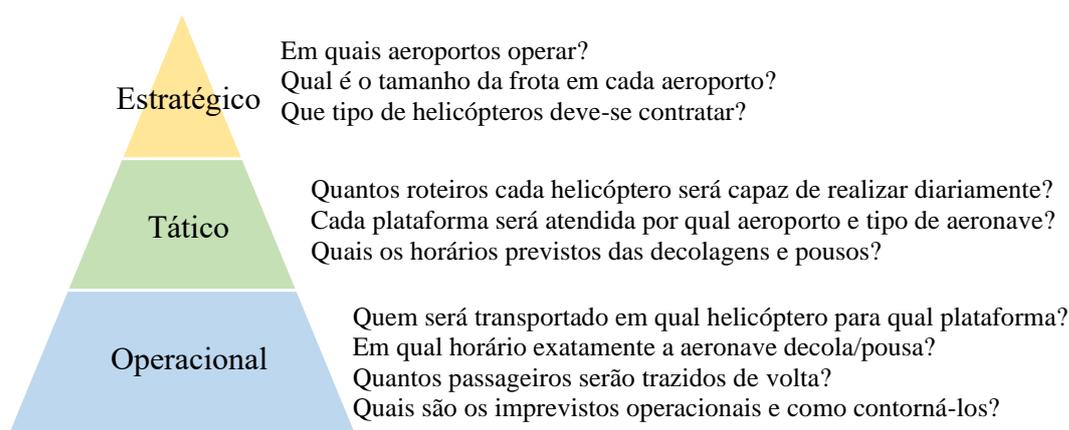


Figura 5 – Hierarquia do planejamento logístico aplicada ao transporte aéreo offshore

Fonte: O autor (2020)

De acordo com Ballou (2006), o planejamento estratégico é considerado de longo prazo, com o horizonte temporal de mais de um ano. O planejamento tático

tem um horizonte temporal intermediário, normalmente inferior a um ano. O planejamento operacional é o processo decisório de curto prazo, com decisões tomadas diariamente ou até mesmo a cada hora. É importante ressaltar também que cada nível de planejamento, principalmente devido à distância temporal da execução do plano, possui diferentes níveis de incerteza.

Conforme cita Ballou (2006), para a execução das atividades de planejamento operacional e tático muitas vezes são exigidos conhecimentos profundos de determinado problema, e abordagens específicas devem ser personalizadas para cada operação. Sena (2011) apresenta em seu trabalho uma proposta de divisão específica para a atividade de transporte aéreo offshore. Sena (2011) aborda cada nível de planejamento, incluindo o horizonte temporal, os prazos de atualização e as tarefas a serem realizadas. Sugere-se, no entanto, uma atualização desta proposta conforme Tabela 3, de modo que melhor reflita a prática atual.

Tabela 3 - Níveis de planejamento para a operação do transporte aéreo offshore

Nível de Planejamento (Atividade)	Horizonte (Atualização)	Descrição
Estratégico (Planejamento de rede)	10 anos (Anual)	- Análise da disponibilidade de aeroportos para atendimento aos campos de petróleo que serão atendidos.
Estratégico (Dimensionamento de frota para longo prazo)	5 anos (Anual)	- Definição do tamanho e do perfil esperado da frota em cada aeroporto. - Elaboração das estimativas de custos para subsidiar o planejamento estratégico da empresa.
Tático (Dimensionamento de frota para médio prazo (foco na contratação e no orçamento do plano de negócios anual))	3 anos (Anual)	- Dimensionamento de frota a ser contratada. - Proposta de distribuição da frota nos aeroportos.
Tático (Definição das tabelas de voo)	6 meses (Trimestral, e sob demanda de alguma mudança de localização de unidade marítima)	- Definição de quais aeroportos atenderão quais plataformas (obs.: muito importante para o planejamento de viagens dos passageiros vindo de suas residências). - Definição de quais aeronaves, em quais dias e horários, atenderão cada plataforma, com quantas vagas disponíveis.
Operacional (Alocação de Fluxo e Roteirização)	2~3 dias (Diária, e sob demanda de alguma necessidade especial de unidade marítima)	- Programação diária dos atendimentos seguindo os horários de voo pré-definidos por unidade marítima e as solicitações de atendimento extemporâneas do dia. - Busca de soluções para os imprevistos operacionais (meteorologia, indisponibilidades de helicópteros, e necessidades especiais não planejadas)

Fonte: Adaptado de SENA (2011)

Para fins deste estudo, é relevante destacar que seu objetivo está situado no nível de planejamento tático, buscando uma solução ótima para suporte à decisão na atividade de definição das tabelas de voo.

É interessante mencionar que em pesquisa recente realizada por Mendes (2020) não foram encontrados estudos na literatura sobre este tipo de planejamento, especialmente dedicado à geração de tabelas de voo para a operação offshore. Mendes (2020) ainda cita que, embora existam diversos estudos sobre a otimização na aviação comercial, a abordagem utilizada pelo transporte em helicópteros no ambiente offshore é diferente. Neste, a demanda é conhecida e de propriedade da empresa de petróleo, além de haver um compromisso firme do operador em atender à totalidade da demanda gerada em suas plataformas. Ou seja, a oferta de voos segue fielmente a demanda de transporte. Por outro lado, no caso da aviação comercial a demanda é estimada e depende de fatores de mercado, e não há obrigatoriedade de atendimento em sua totalidade. Neste último caso, o preço cobrado pelas operadoras da aviação comercial será o fator regulador da demanda de transporte.

2.2

Planejamento de helicópteros offshore

Há na literatura alguns estudos que abordam o tema do planejamento de helicópteros na indústria offshore. Ainda na década de 90, Galvão e Guimarães (1990) analisaram a operação da Petrobras à época e propuseram um algoritmo para roteirização no nível operacional para suporte ao planejamento das operações da bacia de Campos. Naquela mesma década, Fiala e Pulleyblank (1992) desenvolveram métodos heurísticos para a otimização de rotas para as cerca de quarenta e cinco unidades marítimas na costa da Nigéria que atendiam à empresa Mobil à época, buscando atender no nível operacional a todas as demandas diárias de passageiros e minimizando a distância total percorrida pelos helicópteros durante o dia.

Na década seguinte, os trabalhos de Moreno et al. (2006) e Menezes et al (2010) apresentam o desenvolvimento e aprimoramento do software chamado MPROG, que trabalha com um modelo de Programação Inteira Mista solucionado através de um algoritmo heurístico que propõe uma alocação ótima de frota no nível

operacional para o atendimento à demanda de voos da Petrobras na bacia de Campos. Sena (2011) também utiliza um modelo de Programação Inteira Mista com o objetivo de suportar o planejamento da rede logística para a operação aérea. Qian et al. (2011, 2012, 2015) propuseram algoritmos de roteirização de helicópteros para as operações offshore na Noruega, com o objetivo de reduzir o risco intrínseco das operações para pilotos e passageiros. É importante salientar que, ao invés da minimização dos custos, o objetivo destes trabalhos foi o de minimizar a exposição ao risco de acidentes. Independentemente desta mudança de foco na função objetivo, a abordagem utilizada está em linha com a redução de custos, pois de forma indireta busca reduzir a quantidade de horas voadas e a quantidade de pousos e decolagens em plataformas.

Rosa et al. (2016) apresentam uma solução para o Capacitated Helicopter Routing Problem (CHRP), utilizando uma meta-heurística de Clustering Search (CS) para buscar uma solução de planejamento operacional de custo mínimo. O trabalho de Rosa et al. (2016) foi testado nas operações da Petrobras.

As operações em helicópteros no maior campo produtor de gás natural do mundo, localizado entre o Irã e o Catar, foram estudadas por Abbasi-Pooya e Kashan (2017), que propuseram a inclusão de várias heurísticas junto com uma busca local para melhorar a performance do método *Grouping Evolution Strategy* (GES) para a obtenção da solução ótima para o atendimento às onze plataformas offshore naquela operação.

Tais trabalhos mostram que há estudos sobre o tema de planejamento das operações offshore em helicópteros. No entanto, a abordagem em geral é focada no planejamento operacional ou estratégico.

2.3

Problema da Mochila

Dado um conjunto de restrições e opções de escolha é relativamente simples encontrar problemas da vida real que consistam na seleção de um subconjunto que atenda às restrições impostas, maximizando-se o objeto da escolha. Uma forma ilustrativa deste tipo de situação é apresentada na literatura como o “Problema da Mochila” ou *Knapsack Problem* (Kellerer, 2004; Martello e Toth, 1999). Este problema consiste na escolha do grupo de elementos a serem alocados numa

mochila de forma que maximizem o valor total carregado na mesma sem que o limite de peso desta seja ultrapassado. Uma ilustração deste problema pode ser observada na Figura 6.

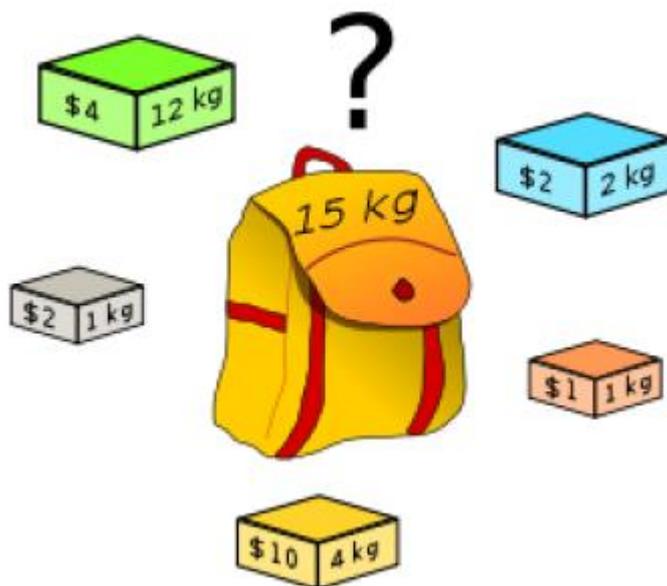


Figura 6 – Ilustração do Problema da Mochila Binária (KP01).
Fonte: Extraído de AMARANTE, 2013

O Problema da Mochila pode ser descrito da seguinte forma: Seja N um conjunto de n itens disponíveis, e a cada item i é atribuído um valor v_i e um peso (ou volumes) p_i . Seja c a capacidade de uma mochila onde se pretende alocar um subconjunto $x \subset N$, de tal forma que a soma dos valores dos itens contidos em x seja o maior possível, sem que a soma dos pesos dos itens pertencentes a x ultrapasse a capacidade c da referida mochila. Como, em resumo, o problema se resume à decisão binária de alocar ou não cada item na mochila respeitando as restrições e maximizando o valor total alocado, ele também é conhecido na literatura como Problema da Mochila Binária, ou *Binary Knapsack Problem*, representado pela sigla KP01. Utilizando a representação binária de solução, pode-se dizer que $x_i \in \{0,1\}$. Se o item i será alocado na mochila é convencionalmente que $x_i=1$. Caso contrário, $x_i = 0$.

Este é um dos clássicos problemas do tipo NP-Difícil em pesquisa operacional e possui vasta lista de aplicações (Kellerer, 2004). Sua formulação matemática padrão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{Maximizar: } z = \sum_{i=1}^n v_i \cdot x_i \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i \leq c \quad (2)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad ; \forall i \in N \quad (3)$$

A equação (1) contém a função objetivo a ser maximizada e busca alocar o maior valor total possível nos itens que forem escolhidos a estar na mochila. A restrição (2) obriga que o somatório dos pesos dos elementos escolhidos seja menor ou igual à capacidade da mochila. As restrições (3) indicam que as variáveis de decisão sejam binárias.

De acordo com Ezugwu (2019), este tipo de problema aparece em processos de suporte à tomada de decisão em uma enorme variedade de campos. Dentre outros, podemos citar problemas de alocação ótima de capital, carregamento máximo em navios e caminhões, problemas de escolha alocação de recursos, dentre outras formulações úteis.

Há diferentes formas de se abordar este problema do ponto de vista dos algoritmos utilizados na busca por sua solução. Ezugwu (2019) realizou um estudo recente onde compara vários métodos, incluindo uma variedade de algoritmos heurísticos e metaheurísticos que incluem Algoritmo de Busca Gulosa (GSA), Programação Dinâmica (DP), *Branch-and-Bound* (BB), Algoritmo Genético (GA) e *Simulated Annealing* (SA). A escolha do método a ser utilizado dependerá do nível de complexidade da implementação do algoritmo selecionado e do desempenho em termos de tempo de processamento até a obtenção da solução adequada, seja ela ótima ou sub-ótima.

O problema da mochila binária possui variantes e extensões interessantes para diferentes aplicações referenciadas na literatura. Kellerer (2004), Martello e Toth (1999) abordam algumas destas variantes em seus trabalhos, principalmente com aplicações práticas. Serão apresentadas a seguir algumas mais importantes para fins deste trabalho.

2.4

Problema da Mochila com repetições

No caso da mochila binária, o vetor de soluções permite apenas duas opções do tipo $\{0,1\}$, que significam que determinado item i deve ser alocado na mochila ($x_i = 1$), ou não ($x_i = 0$). Isso significa que cada item só pode ser colocado no máximo uma vez na mochila. Porém uma forma ampliada deste problema ocorre quando é possível colocar mais de uma unidade de cada item na mochila.

Caso seja possível repetir indefinidamente cada item, este problema é chamado de ilimitado, ou *Unbounded Knapsack Problem* (UKP). Caso haja um número finito de repetições possíveis de cada item, ele é chamado de limitado, ou *Bounded Knapsack Problem* (BKP).

No caso do problema ilimitado, ao invés das restrições $x_i \in \{0,1\}$, as restrições nas variáveis de decisão se tornam $x_i \in \mathbb{N}$. No problema limitado, além de $x_i \in \mathbb{N}$, há um conjunto de restrições adicionais do tipo $0 \leq x_i \leq b_i$, para todo item i . O valor de b_i , do inglês *bound*, ou limite, representa a quantidade de cópias ou repetições possíveis de itens i no problema em questão.

É importante mencionar que é possível lidar com o problema da mochila com repetições limitadas (BKP) num problema da mochila binária (KP01). Para tal, é necessário considerar cada cópia de um mesmo item como itens diferentes. Como resultado prático, aumenta-se o número de itens i a serem alocados, mas são reduzidas as restrições do problema.

2.5

Problema das Múltiplas Mochilas

A complexidade do problema pode ser substancialmente aumentada quando se utilizam várias mochilas ao invés de apenas uma. Esta variante é chamada de Problema das Múltiplas Mochilas, ou *Multiple Knapsack Problem*, conhecido pela sigla MKP. Uma ilustração desta variante pode ser vista na Figura 7.

No caso de serem mochilas iguais, é possível encontrar uma solução não-ótima através de uma heurística simples, resolvendo-se repetidas vezes o problema da mochila binária em sequência, porém retirando os vetores solução de cada

mochila preenchida das possibilidades de solução para as próximas. Para todos os efeitos, trata-se de vários problemas NP-Difíceis resolvidos em sequência.

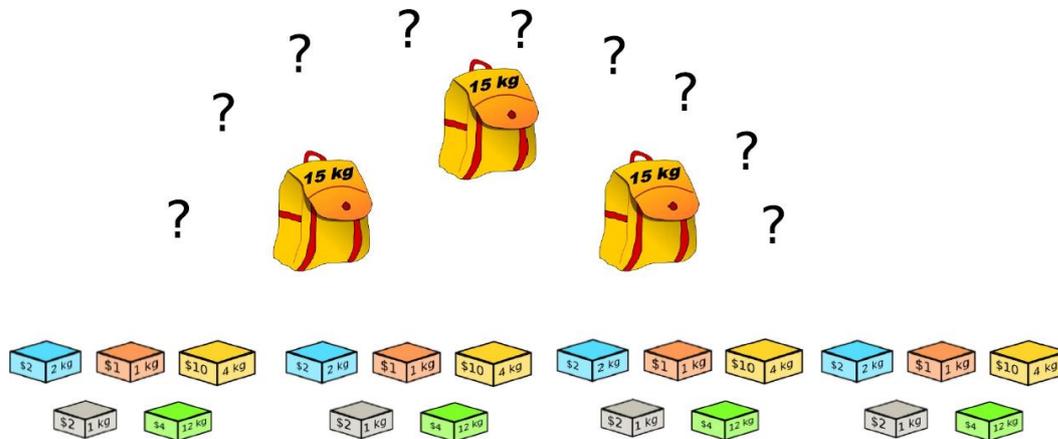


Figura 7 – Ilustração do Problema de Múltiplas Mochilas (MKP)

Fonte: Extraído de AMARANTE, 2013

A complexidade do problema fica ainda maior se forem utilizadas mochilas de capacidades variadas. Heringer (2019) sugere a aplicação de uma heurística específica para a solução do problema de múltiplas mochilas com tamanhos variados para a redução de custos no transporte aéreo offshore.

O problema das múltiplas mochilas pode ser descrito conforme detalhado por Martello e Toth (1990). Seja N um conjunto de n itens disponíveis, e a cada item i é atribuído um valor v_i e um peso (ou volume) p_i . Seja M um conjunto de m mochilas, e cada mochila j possui uma capacidade c_j . A variável $x_{ij} \in \{0,1\}$ indica se o item i será acomodado ou não na mochila j . Se o item i estiver na mochila j , $x_{ij}=1$. Caso contrário, $x_{ij}=0$. A formulação matemática padrão do Problema das Múltiplas Mochilas pode ser descrita da seguinte forma:

$$\text{Maximizar: } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_i \cdot x_{ij} \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_{ij} \leq c_j \quad ; \forall j \in M \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad ; \forall i \in N \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \forall i \in N, \forall j \in M \quad (7)$$

A equação (4) contém a função objetivo a ser maximizada e busca alocar o maior valor total possível nos itens que forem escolhidos a estar nas várias mochilas. As restrições (5) obrigam que o somatório dos pesos dos elementos escolhidos a estar numa determinada mochila seja menor ou igual à sua capacidade. Estas restrições são aplicadas a todas as mochilas contidas em M . As restrições (6) evitam que um mesmo item seja alocado em mais de uma mochila simultaneamente. As restrições (7) indicam que as variáveis de decisão sejam binárias.

É possível perceber que se $m = 1$, o problema das múltiplas mochilas é reduzido ao problema da mochila binária, já definido anteriormente. Ou seja, esta é uma forma mais geral do problema.

2.6

Problema da Soma de Subconjunto

Um caso particular do Problema da Mochila ocorre quando o que se deseja maximizar não é o valor total do conjunto dos itens escolhidos, respeitando a capacidade da mochila. Ao invés disso, deseja-se ocupar ao máximo a capacidade da mochila, evitando deixar espaços vazios que possam ser ocupados caso os itens sejam escolhidos de maneira mais adequada. Neste caso, o valor de cada item a ser alocado é seu próprio peso (ou volume), ou seja, $v_i = p_i$.

Este caso é chamado na literatura como o problema da Soma de Subconjunto, ou *Subset Sum Problem* (SSP). É possível encontrar referências a este caso específico do problema da Mochila com outras nomenclaturas como *Value Independent Knapsack Problem* ou *StickStacking Problem* (Kellerer, 2004).

2.7

Problema da Soma de Múltiplos Subconjuntos

Kellerer (2004) e Caprara (2000) apresentam um caso específico do Problema das Múltiplas Mochilas, onde deseja-se ocupar ao máximo a capacidade total das mochilas, evitando deixar espaços vazios. Tal problema é conhecido como *Multiple*

Subset Sum Problem (MSSP), e trata-se de uma generalização do Problema da Soma de Subconjunto, para vários subconjuntos com capacidades diferentes. A formulação é exatamente igual à do problema de múltiplas mochilas, porém substituindo o valor de cada item a ser alocado por seu próprio volume (ou peso), ou seja, $v_i = p_i$.

2.8

Variantes adicionais

É importante observar que o problema de múltiplas mochilas (MKP) é diferente de uma outra variante, chamada de *Multiple-Choice Knapsack Problem* (MCKP), descrito por Bednarczuk (2018), Kellerer (2004). Neste caso, o conjunto de itens é particionado em classes. A escolha de quais itens deverão ser alocados na mochila é substituída pela seleção de exatamente um item de cada classe. Este caso pode ser entendido como uma generalização do problema da mochila binária.

Balashov (2018) ainda traz uma versão modificada do problema das múltiplas mochilas, o qual citou como *Modified Multiple Knapsack Problem* (MMKP), utilizando-a para otimização do processamento em sistemas aviônicos. Nesta versão modificada, o objetivo consiste em manter certos pares de itens nas mesmas mochilas e, caso os itens de um determinado par fossem alocados em mochilas diferentes, seus valores eram zerados, não contribuindo para a maximização da função objetivo.

Núñez e Halman (2018) sugeriram uma outra versão modificada deste problema para otimizar o agendamento da publicação de comerciais de televisão. Neste caso, o peso do item numa determinada mochila seria diferente a depender de sua posição relativa.

A menção de tais variantes se faz relevante pois, mesmo não sendo objeto de apuração neste trabalho, reforçam a vasta aplicabilidade do problema da mochila em várias áreas da indústria. Para efeito desta dissertação, seria possível afirmar que o problema abordado se refere ao *Multiple Bounded Subset Sum Problem* (MBSSP), mesmo que não tenham sido encontradas na literatura referências a esta variante do problema tradicional.

3

Metodologia

Neste capítulo será abordada a questão da composição dos principais custos associados à operação da frota de helicópteros e as propostas básicas para a redução de cada parcela. Será visto que, como o foco deste trabalho faz referência ao planejamento tático, em que a frota já está dimensionada, contratada e distribuída nas várias bases aéreas, a abordagem da busca por solução ótima através do Problema da Mochila faz sentido para permitir a busca do melhor aproveitamento dos helicópteros disponibilizados nas bases aéreas mais econômicas.

3.1

Composição dos custos da operação

Ballou (2006) menciona que um serviço de transporte incorre em uma série de custos como mão-de-obra, combustível, manutenção, equipamentos e consumíveis. Ballou (2006) sugere que a combinação de tais custos possa ser arbitrariamente dividida em duas partes: os custos que variam com a quantidade de serviços prestados ou volume transportado, por exemplo, e os custos fixos da disponibilidade do serviço de transporte. No caso específico da Petrobras, os helicópteros são contratados pelo modelo chamado de afretamento. Tal modelo pressupõe a disponibilidade exclusiva da aeronave durante um período do dia, de onze ou doze horas. As demais horas são dedicadas à realização de atividades de manutenção e limpeza das aeronaves. A disponibilidade é remunerada de forma regular, sendo paga uma tarifa invariável mensalmente. Tal remuneração visa arcar com os custos que independem da quantidade de horas voadas, tais como de pessoal, infraestrutura, contratos de leasing dos helicópteros e custos administrativos em geral.

Ao longo do dia, durante as onze ou doze horas contratadas, é esperado que os helicópteros realizem os voos para o transporte de passageiros e pequenas cargas. A remuneração do operador aéreo em função das horas voadas é a chamada parcela variável e busca remunerá-lo pelo desgaste de peças e consumo de combustível gasto nas operações. Um esquemático da composição de custos fixos e variáveis

pode ser observado na Figura 8.

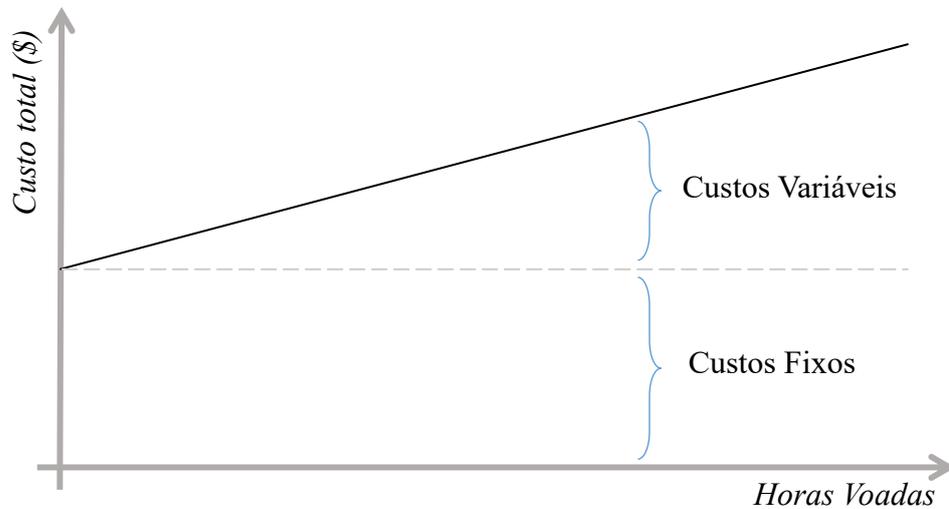


Figura 8 - Composição de custos fixos e variáveis em função das horas voadas
Fonte: O autor (2020)

3.2

Estratégias para redução do custo variável

Para a redução dos custos variáveis há basicamente duas estratégias: utilizar preferencialmente as aeronaves que possuam menor custo por hora voada e reduzir a quantidade de horas voadas, maximizando a utilização dos assentos disponíveis. Há na literatura trabalhos recentes e aplicados ao problema em questão que abordam estas duas estratégias. Mendes (2020) detalha a estrutura de custos que incorrem sobre os contratos do transporte aéreo da Petrobras e propõe uma solução de otimização da parcela variável dos custos dos contratos. O objetivo do modelo desenvolvido por Mendes (2020) reside na minimização do custo variável ao buscar a redução das horas voadas utilizando ao máximo a capacidade de cada aeronave e dando sempre preferência aos helicópteros mais econômicos.

Pereira (2020) utiliza em seu trabalho um modelo de PLI (Programação Linear Inteira) para resolver o problema da alocação de facilidades aplicado ao transporte aéreo. O objetivo principal de seu estudo é definir qual aeroporto será utilizado prioritariamente para o atendimento de cada unidade marítima. O modelo proposto por Pereira (2020) considera as limitações de pátio de cada aeroporto bem como a capacidade de processamento de passageiros.

3.2.1

O uso das mediatrizes para escolha de aeroportos

Apesar do interessante trabalho proposto por Pereira (2020), foi considerada uma técnica simplificada de escolha das bases aéreas mais econômicas para o atendimento de cada unidade marítima. É importante lembrar que várias unidades mudam de posição geográfica frequentemente (ex. navios e sondas). Assim, para evitar os sucessivos cálculos de distâncias de cada unidade marítima para as várias bases aéreas, foi utilizado o conceito da mediatriz do segmento de reta que passa por dois pontos. Sabe-se que, por definição, a mediatriz é o lugar geométrico dos pontos equidistantes dos extremos de um segmento. Na Figura 9 é possível perceber que os pontos vermelhos, situados sobre a mediatriz formada a partir do segmento de reta que une os pontos A e B, são equidistantes de ambos. Através da Figura 9 fica fácil perceber que qualquer ponto situado à direita da mediatriz estará mais próximo do ponto B do que de A, e vice-versa.

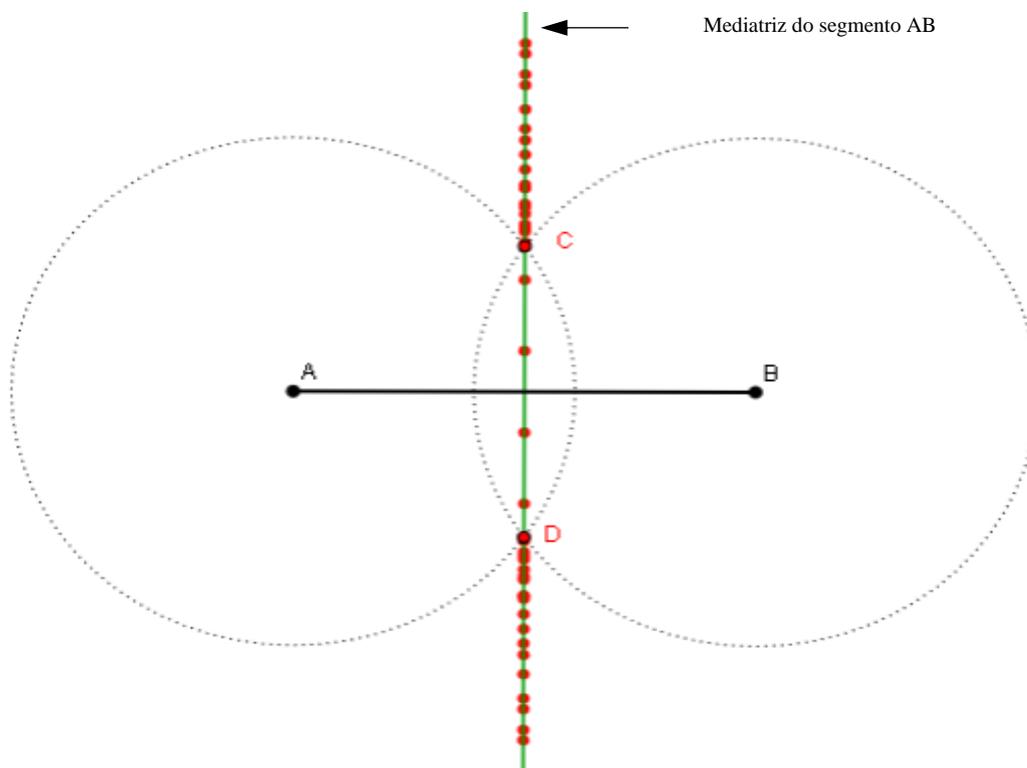


Figura 9 - Ilustração da propriedade da mediatriz
Fonte: O autor (2020)

A partir desta definição, é possível utilizar várias mediatrizes para uma solução simplificada do problema de alocação de facilidades. É importante deixar claro que, para o problema da aviação offshore, os custos variáveis são função direta e linear da quantidade de horas voadas que, por sua vez, por conta da velocidade de cruzeiro constante, variam também linearmente com a distância percorrida. É por esta razão que se pode utilizar, de forma simplificada e direta, este artifício sem prejuízo da qualidade da solução. A Figura 10 ilustra a técnica utilizada, traçando-se as mediatrizes entre os pontos A e B, e depois entre B e C para a definição das regiões preferenciais (não necessariamente ótimas) de atendimento de cada aeroporto.

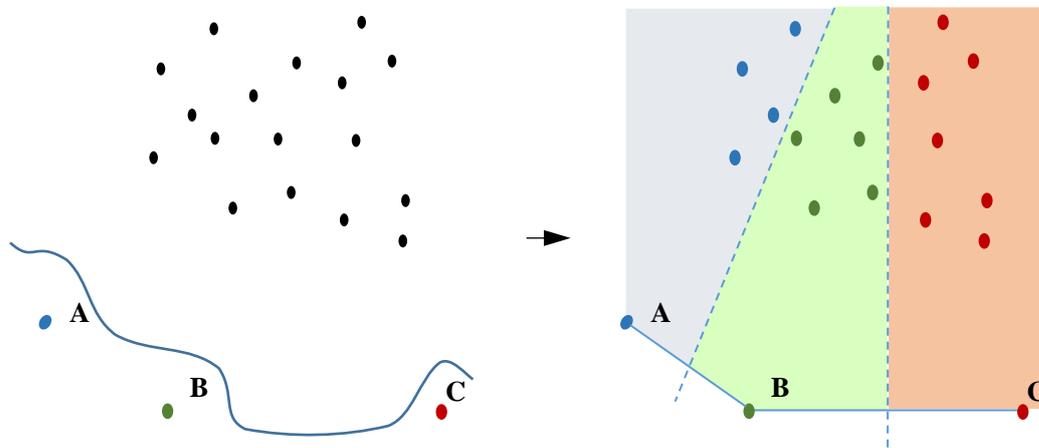


Figura 10 - Problema de alocação de facilidades simplificado com uso de mediatrizes

Fonte: O autor (2020)

Esta técnica simplificada foi comparada com os resultados obtidos por Pereira (2020) e se mostra, apesar de sua extrema simplicidade, uma boa aproximação para a aplicação na aviação offshore. A Figura 11 foi extraída e adaptada do trabalho de Pereira (2020). À figura original foi incluída uma linha vermelha unindo os dois aeroportos considerados, a saber, os aeroportos de Jacarepaguá e Cabo Frio (SCJR e SBCB). Nesta linha vermelha foi incluída a mediatriz entre os pontos sobre os aeroportos, representada pela linha amarela tracejada. As unidades marítimas estão localizadas nos centros dos círculos verdes e vermelhos. Todas em vermelho, atendidas de forma ótima pelo aeroporto de Jacarepaguá, estão do lado esquerdo da mediatriz e todas em verde, atendidas de forma ótima pelo aeroporto de Cabo Frio, estão à sua direita.

Definida a base preferencial para a alocação dos voos, o problema subsequente é alocar todos os atendimentos, ou a maior quantidade possível, no aeroporto escolhido. A forma de fazer esta alocação de voos na programação é detalhada mais à frente.

3.3

Estratégias para redução do custo fixo

É importante mencionar que a forma de reduzir os custos fixos da frota a serviço da Petrobras são duas: a redução da quantidade de helicópteros ou a busca por redução de preços junto aos fornecedores. No entanto, mesmo considerando-se que tais custos sejam fixos no horizonte temporal da realização deste trabalho, é proposta uma forma de maximização do uso da frota disponível nas bases mais econômica. Isso permite reduzir a quantidade de horas úteis de voo sem atendimento alocado, reduzindo a ociosidade da frota. Ou seja, o custo fixo no caso em questão não será reduzido de imediato, mas cada real pago pela disponibilidade da frota será melhor aproveitado maximizando-se a quantidade de voos realizados num dia por um determinado helicóptero, desde que este esteja alocado numa base de atendimento preferencial, como é o caso do Heliporto de São Tomé. Como consequência desta melhor utilização das aeronaves contratadas é esperado um efeito futuro de redução da quantidade de frota contratada para o atendimento à demanda total. No entanto, não é esperada a captura destes ganhos econômicos no horizonte temporal deste trabalho.

3.4

Mapeamento para o problema da literatura

Para fins do trabalho em questão, como foi elucidado na seção 3.2, a redução dos custos variáveis da operação aérea da Bacia de Campos seria obtida através da utilização preferencial do Heliporto de São Tomé, que é a base preferencial para a maioria das unidades marítimas nesta região de interesse, conforme Figura 12.

Ao utilizar esta base em detrimento das demais, é possível afirmar que haverá redução das distâncias percorridas, demandando menor tempo de voo e gerando custos reduzidos. No entanto, seria necessário calcular qual a máxima quantidade

de voos possível a partir daquela base, considerando as restrições legais e operacionais. Ou seja, o problema passa a estar focado na utilização máxima da disponibilidade dos helicópteros contratados para Farol de São Tomé. Em outras palavras, o custo variável pode ser reduzido ao se utilizar a base mais próxima das unidades marítimas, transferindo voos de Campos e Macaé para São Tomé. Mas é preciso fazer com que tais voos “caibam” nas janelas temporais disponíveis. Assim, o Problema das Múltiplas Mochilas, conhecido na literatura como *Multiple Knapsack Problem* (MKP) se apresenta como uma alternativa interessante para a resolução deste problema. Desta forma, o modelo matemático descrito por Martello & Toth (1990) apresentado na seção 2.5 foi adaptado ao caso dos helicópteros. Como o que se pretende maximizar é exatamente a utilização das janelas, ocupando-as ao máximo na tentativa de reduzir os voos em outras bases mais distantes, também seria correto afirmar que se trata do Problema de Múltiplos Subconjuntos, pois o valor de cada voo é o seu próprio volume. Todavia, como o MKP é uma formulação mais geral deste problema, esta será a referência adotada para a situação em questão.

De toda forma, o objetivo principal é maximizar a utilização do volume total disponível das mochilas, ou seja, enchê-las ao máximo. Este converge com o objetivo que foi descrito na seção 1.7, de conseguir alocar a máxima quantidade de voos diários nos vários helicópteros disponíveis numa base aérea.

As variáveis foram definidas conforme o seguinte racional. Há vários voos realizados num dia de operações, em vários helicópteros, de tipos diferentes. Cada helicóptero ocupa uma janela operacional, que se inicia no horário da primeira decolagem e termina no limite do pôr-do-sol. Por questões de limitação física no heliporto, não é possível que todos os helicópteros decolem simultaneamente, por isso as janelas se iniciam em horários diferentes entre si, apesar de terminarem no mesmo horário. Desta forma, o problema de mochila foi reescrito considerando as adequações detalhadas a seguir.

Foi visto que cada helicóptero conterà uma quantidade de voos em sua programação diária. Cada um deles inicia suas operações numa hora diferente, mas todos precisam estar pousados no mesmo horário do pôr-do-sol. Este horizonte temporal desde a primeira decolagem possível até o limite regulatório foi chamado de janela. As janelas temporais foram consideradas as mochilas do problema em questão. Cada janela poderá possuir um helicóptero associado, ou simplesmente

ficar livre pela falta de um helicóptero para seu uso. Para esta situação foi criado um conjunto de variáveis de decisão que indicam a alocação de determinado helicóptero a uma janela específica.

Os itens considerados para serem alocados nos helicópteros são os voos para atendimento às plataformas. O volume (ou peso) de cada voo é a sua duração total. É importante ressaltar que deve ser somado à duração total do voo o tempo de *setup* entre voos. Este tempo, chamado de entrevoos é necessário para a realização de inspeções na aeronave, pausa para os tripulantes, abastecimento, além da elaboração e aprovação dos planos de voo. Normalmente são utilizados 45 minutos de tempo mínimo de entrevoos. Para indicar se um determinado voo foi alocado em uma determinada janela foi criado um outro conjunto de variáveis de decisão.

O valor de cada voo, ou seja, de cada item, é também a sua duração total, pois o que se busca otimizar é justamente o aproveitamento máximo das janelas operacionais disponíveis, que possuam helicópteros associados, alocando nelas a maior quantidade possível de voos.

E por fim, a capacidade de cada mochila é a janela temporal útil de cada helicóptero. Destaca-se que, ao considerar o volume de cada item a ser alocado, foram somados aos tempos de cada voo o tempo de entrevoos entre sucessivas missões (*setup*). Em um helicóptero em que haja x voos em um dia, haverá $x-1$ entrevoos. Por isso, no cálculo da capacidade de cada mochila, ou seja, na janela temporal útil de cada helicóptero deve ser considerado o tempo entre a primeira decolagem e o pôr-do-sol, somando-se a este valor um tempo de entrevoos. A Tabela 4 mostra um comparativo entre o problema de múltiplas mochilas em sua forma padrão e o problema da programação de voos.

Tabela 4 – Comparativo do MKP padrão e do Problema em questão

MKP padrão	Problema em questão
Itens a serem alocados nas mochilas	Voos previstos para atendimento às plataformas
Volume (ou peso) de cada item	Duração total de cada voo, somado um tempo de entrevoos
Valor de cada item	Também é a duração total de cada voo, somado um tempo de entrevoos.
Mochilas	Janelas temporais desde a primeira decolagem até o limite do pôr-do-sol, somado um tempo de entrevoos

Fonte: O autor (2020)

Partindo da formulação matemática descrita na seção 2.5, tem-se a seguinte adaptação para o problema em questão: Seja V um conjunto de voos demandados, onde cada voo v possui duração t_v . Sabe-se que após cada voo é realizada uma pausa de duração E para a realização de atividades de entrevoos. Seja J um conjunto de janelas temporais, contadas desde o momento da primeira decolagem possível até o limite do pôr do sol. Cada janela j possui uma duração D_j .

Seja K o conjunto dos tipos de helicópteros disponíveis (ex, HGP, HMP). Seja N_k a quantidade de helicópteros do tipo k disponíveis numa determinada base. Seja V_k o subconjunto de V com os voos que demandam atendimento por helicópteros do tipo k . Destaca-se que V e V_k se relacionam das seguintes formas: $V = \cup V_k$, $\forall k \in K$ e $\cap V_k = \emptyset$, $\forall k \in K$.

A variável $x_{vj} \in \{0,1\}$ indica se o voo v será alocado ou não na janela j . Caso seja, $x_{vj} = 1$, caso contrário $x_{vj} = 0$. A variável $y_j \in \{0,1\}$ indica se a janela j está aberta, ou seja, se será alocado algum helicóptero à esta janela. Caso seja, $y_j = 1$, caso contrário, $y_j = 0$. Por fim, a variável $z_{kj} \in \{0,1\}$ indica se um helicóptero do tipo k será alocado na janela j . Caso seja, $z_{kj} = 1$, caso contrário $z_{kj} = 0$.

Assim, a formulação matemática do problema da maximização da alocação de voos nas janelas de operação pode ser descrita da seguinte forma:

$$\text{Maximizar: } z = \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} (t_v + E) \cdot x_{vj} \quad (8)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{j \in J} x_{vj} \leq 1 \quad ; \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{v \in V} (t_v + E) \cdot x_{vj} \leq (D_j + E) \cdot y_j \quad ; \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{v \in V_k} x_{vj} \leq M \cdot z_{kj} \quad ; \forall j \in J, k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} z_{kj} \leq y_j \quad ; \forall j \in J \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} z_{kj} = N_k \quad ; \forall k \in K \quad (13)$$

$$x_{vj} \in \{0,1\} \quad ; \forall v \in V, j \in J \quad (14)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad ; \forall j \in J \quad (15)$$

$$z_{kj} \in \{0,1\} \quad ; \quad \forall k \in K, j \in J \quad (16)$$

A equação (8) constitui a função objetivo que se pretende maximizar. A intenção é alocar os voos de forma que preencham ao máximo as janelas disponíveis. É importante destacar que após cada voo de duração t_v haverá um tempo de *setup* de duração E , cuja duração também é considerada na equação (8). As restrições (9) impedem que um determinado voo seja alocado de forma redundante em outras janelas. As restrições (10) obrigam que o somatório dos tempos de voo e dos respectivos entrevoos sejam menores do que a janela temporal disponível para a operação. As restrições (11) determinam que um voo somente seja alocado em um helicóptero compatível com o tipo desejado. Nestas restrições é importante destacar que M é um número suficientemente grande, conhecido como *Big M*. As restrições (12) impedem que sejam alocados voos onde não houver helicóptero alocado. As restrições (13) garantem a alocação de cada helicóptero disponível na base em alguma janela. As restrições (14), (15) e (16) indicam que as variáveis de decisão sejam binárias.

4

Aplicação

4.1

Missão típica

Em geral, os voos offshore realizados pela Petrobras para atender a uma determinada unidade marítima utilizam o sistema chamado pendular, conforme descrito por Mendes (2020) e Pereira (2020). Isto significa que um determinado helicóptero decola de um aeroporto em direção a uma plataforma específica para suprir sua demanda de passageiros, realiza a troca de passageiros e retorna para o mesmo aeroporto de origem. É possível que haja pouso em mais de uma plataforma, mas este não é o caso padrão da operação planejada com antecedência. Normalmente esta situação está associada às demandas probabilísticas e compreendem apenas uma minoria da operação aérea offshore, conforme foi visto na seção 1.4.

Após a realização do embarque de passageiros e cargas no helicóptero, cada missão compreende a partida dos motores, execução do *checklist* da tripulação, taxiamento, liberação para decolagem, subida até o nível de voo estabelecido, o voo de cruzeiro, a descida na plataforma e posterior pouso para desembarque dos passageiros que estão chegando à plataforma. Na sequência do desembarque, é feita a troca de coletes salva-vidas e protetores auriculares, e ocorre então o embarque da equipe que está deixando a plataforma. A aeronave então decola da unidade marítima e realiza o trajeto de retorno para o aeroporto de origem. Após o pouso no aeroporto, a aeronave deverá se deslocar até o local onde os passageiros serão desembarcados, realizar o procedimento de corte – desligamento - dos motores, com posterior desembarque dos passageiros, quando ocorre o término da missão.

Um esquemático do perfil de voo pode ser visto na Figura 13. É importante notar que é chamado de tempo de missão o total gasto desde a partida até o corte dos motores.

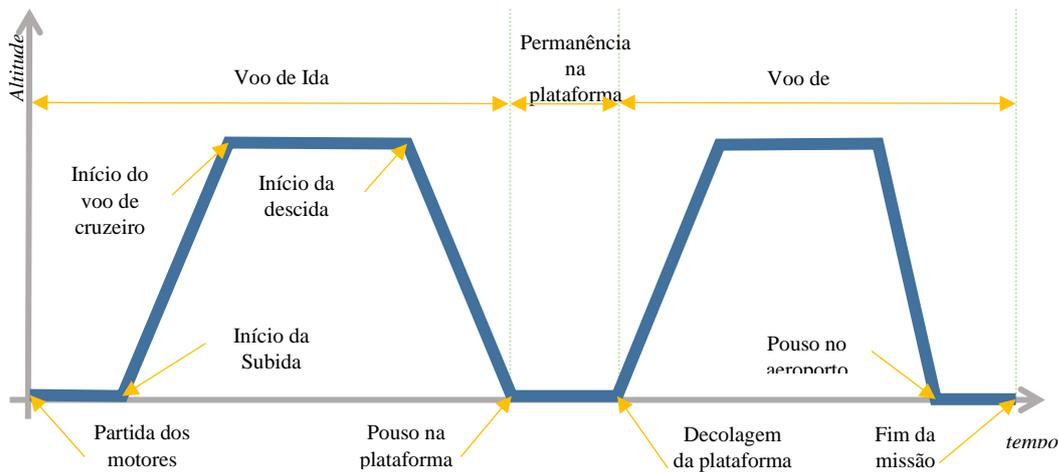


Figura 13 - Composição de tempos para o cumprimento de uma missão.

Fonte: O autor (2020)

Após cada missão realizada, são realizadas inspeções na aeronave para a garantia de sua operacionalidade de forma segura. Os tripulantes avaliam sua próxima missão, um novo planejamento de voo é elaborado, submetido e aprovado pelo órgão aprovador, e o helicóptero é reabastecido de combustível e carregado com pessoas, bagagens e cargas. Um novo ciclo recomeça a partir daí, caracterizando uma nova missão a ser atendida.

Vale ressaltar que, na nova formatação dos contratos de afretamento de helicópteros, quando os tripulantes precisam realizar as pausas regulamentares para descanso e refeições, são substituídos por outros em condições adequadas para operar os helicópteros, que mantêm sua cadência da realização de missões. Este ciclo se repete por três, quatro, ou até cinco vezes ao dia, a depender da demanda, dos tempos de cada missão e da janela operacional disponível num determinado dia, que possui seu limite inferior na primeira decolagem e superior no horário do pôr do sol. Quando um plano de voo indica que o horário do pouso de regresso ao aeroporto de origem se dará após o limite superior, a missão é transferida para o dia seguinte.

4.2

Restrições operacionais

O período útil para a realização de voos offshore se inicia a partir do nascer do sol e obrigatoriamente deve estar finalizado até o pôr do sol. Este requisito fica claro a partir da explicação das condições de excepcionalidades a esta limitação,

notadamente missões do tipo não determinísticas, conforme elucidado na seção 1.4. A regulamentação que estabelece as regras e procedimentos especiais de tráfego aéreo para helicópteros, do Comando da Aeronáutica (ICA, 2018), que versa sobre este tema, estabelece o seguinte texto na seção 6.1.6:

Em heliponto situado em plataforma marítima, somente é permitida a operação entre o pôr e o nascer do sol para:

a) Helicóptero em missão/treinamento de transporte de enfermos ou feridos graves, desde que atendidos os requisitos estabelecidos nesta publicação para o voo VFR ou IFR noturno, conforme o caso.

NOTA: As missões de treinamento mencionadas neste item devem seguir as disposições da ANAC sobre o assunto.

b) Helicóptero a serviço das atividades de pesquisa, perfuração e produção de óleo e gás, nos casos de urgência ou que venham a configurar uma emergência. Nesses voos somente é permitido o transporte de profissionais especializados e/ou equipamentos e materiais para atender a situação de urgência ou emergência, observadas as demais provisões desta publicação.

NOTA: Entende-se por urgência, as seguintes situações que, se não forem adotadas providências corretivas, poderão resultar na evolução para uma situação de emergência:

- Situações que possam vir a comprometer o meio ambiente;*
- Situações que possam vir a comprometer seriamente a integridade física da plataforma marítima;*
- Situações que possam vir a comprometer seriamente a integridade física dos habitantes da plataforma marítima; e*
- Situações que possam vir a colocar em risco a navegação em mar aberto das demais embarcações.*

O horário do pôr do sol varia ao longo do ano e é diferente para cada aeroporto. Tais horários podem ser calculados a partir de equações, mas para efeitos práticos os valores ao longo do ano estão disponíveis nos sites de informações aeronáuticas, conforme exemplo mostrado na Figura 14. Vale observar que a janela útil de um determinado dia, indicada pelo segmento amarelo se inicia no horário da primeira decolagem, marcada no exemplo da Figura 14 para 6h30, e termina no pôr do sol do determinado dia.

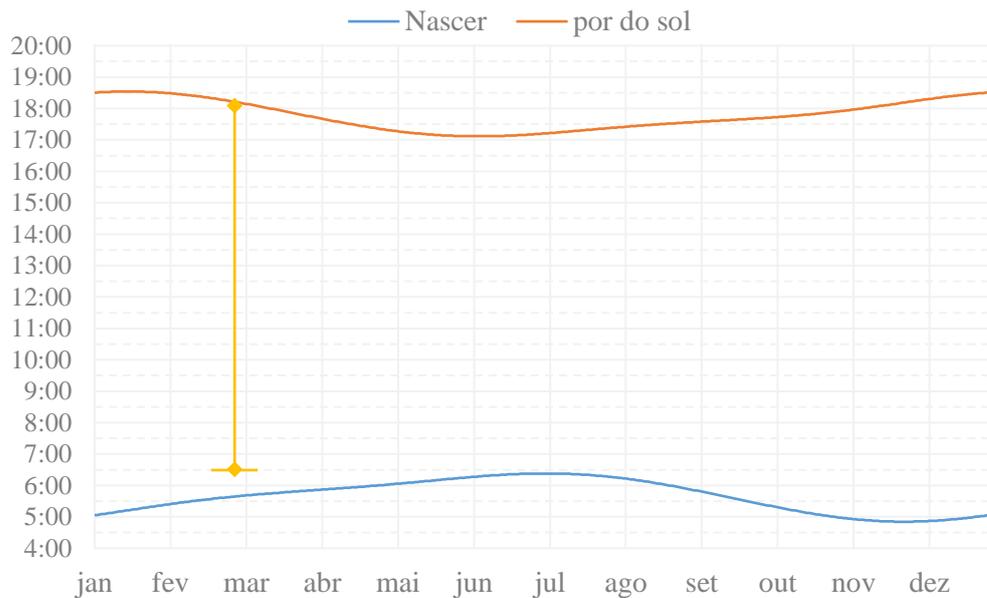


Figura 14 - Nascer e pôr do sol em Farol de São Tomé (SBFS)

Fonte: www.aisweb.aer.mil.br, dados de 2019

4.3

Representação gráfica da programação

Ao abordar a questão da programação de voos a partir da modelagem matemática do problema das múltiplas mochilas, uma questão muito importante veio à tona: a representação gráfica da solução. Ou seja, ao modelar este problema temporal como algo visível (objetos numa mochila), a programação, representada por números numa tabela, foi convertida num simples gráfico. Trata-se do uso de um Diagrama de Gantt para a programação de voos.

Henry Laurence Gantt (1861-1919) começou a utilizar esta técnica originalmente trabalhando como consultor de empresas, na otimização de processos para o aumento da produtividade e da eficiência nas linhas de produção. Atualmente este tipo de diagrama é largamente utilizado em gerenciamento de projetos.

Como o objetivo é gerar automaticamente uma tabela de voos viável e que obedeça às restrições elencadas na seção 4.2, a opção pela representação de solução do algoritmo de forma gráfica serve a avaliação do resultado por um analista, de forma que permita observação de possíveis ajustes posteriores à obtenção do resultado. Uma forma de apresentação dos resultados é mostrada na Figura 15:

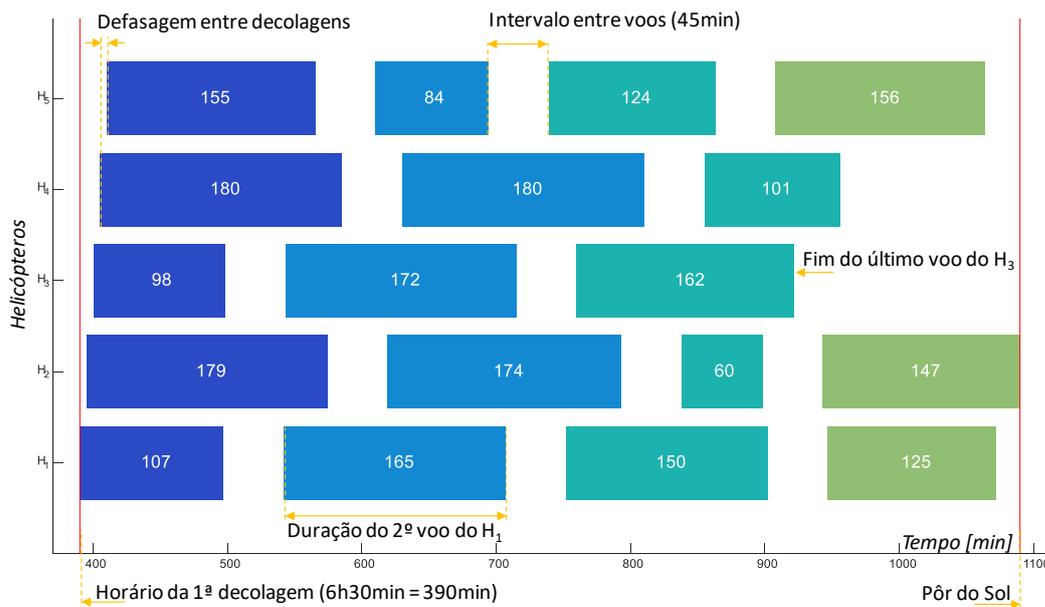


Figura 15 - Representação gráfica de uma solução viável do problema

Fonte: O autor (2020)

Para gerar esta visualização foi utilizado o gráfico de Barras Empilhadas padrão do Microsoft Excel®, com alguns detalhes importantes para facilitar a geração do gráfico. Todos os tempos foram transformados em minutos e a primeira barra de cada helicóptero é o tempo desde as 00h00 até a primeira decolagem. Após cada voo foi adicionado um tempo de entrevoos. As barras dos entrevoos foram pintadas de branco e suas linhas foram retiradas para não dar a impressão de que se tratavam de voos específicos. Foi adicionada também uma linha ao final do dia, representando o limite do pôr-do-sol, para facilitar a visualização das condições limítrofes do problema. O eixo X representa o tempo no decorrer de um dia e o eixo Y contém a visualização de cada helicóptero.

Aparentemente trivial, este tipo de ferramenta não era utilizado pelos analistas, que trabalhavam manualmente utilizando planilhas de horários, conforme o exemplo real mostrado na Tabela 5, chamada de “tabela vertical”.

Tabela 5 – Modelo tradicional de edição da programação, chamado de “tabela vertical”

Dia	Hora	U.M.	Vagas	Matr	Tempo	Porte	CND ↑	CND ↓	Cluster	Giro	Acft
SEG	07:00	PCH2	11	OHJ	1:11	HMP	1	1	MARLIM LESTE	1	MP
SEG	07:12	PNA2	11	OHC	1:14	HMP	1	1	MARLIM LESTE	1	MP
SEG	07:24	P-20	11	OHB	1:28	HMP	1	1	MARLIM NORTE	1	MP
SEG	07:36	SS57	17	OHE	1:37	HGP	1	1	ESPADARTE	1	GP
SEG	07:48	P-32	17	OHU	1:21	HGP	1	1	VIOLA	1	GP
SEG	08:00	UMLI	18	OHG	1:32	HGP	0	0	ALBACORA	1	GP
SEG	08:12	SS85	18	OHF	1:40	-	0	0	JUBARTE	1	GP
SEG	08:24	UMPA	18	JBK	1:29	HGP	0	0	MARLIM LESTE	1	GP
SEG	08:36	Slot livre	0	OHI	-	-	-	-	-	1	GP
SEG	08:48	P-51	18	OHO	1:36	HGP	0	0	MARLIM SUL	1	GP

SEG	09:00	P-26	12	OHJ	1:35	HMP	0	0	MARLIM LESTE	2	MP
SEG	09:12	P-19	11	OHC	1:32	HMP	1	1	MARLIM LESTE	2	MP
SEG	09:48	P-37	11	OHB	1:31	HGP	1	1	MARLIM LESTE	2	MP
SEG	10:00	P-56	18	OHE	1:43	HGP	0	0	MARLIM SUL	2	GP
SEG	10:12	PGP1	18	OHU	1:11	HGP	0	0	MARLIM NORTE	2	GP
SEG	10:24	P-40	18	OHG	1:33	HGP	0	0	MARLIM LESTE	2	GP
SEG	10:36	P-43	18	OHF	1:28	HGP	0	0	MARLIM SUL	2	GP
SEG	10:48	Slot livre	0	JBK	-	-	-	-	-	2	GP
SEG	11:00	NS30	18	OHI	1:11	-	0	0	BADEJO	2	GP
SEG	11:12	P-51	18	OHO	1:36	HGP	0	0	MARLIM SUL	2	GP
SEG	11:24	PNA2	11	OHJ	1:14	HMP	1	1	MARLIM LESTE	3	MP
SEG	11:36	PCP1	11	OHC	1:11	HMP	1	1	CARAPEBA	3	MP
SEG	12:12	PNA1	11	OHB	1:14	HGP	1	1	MARLIM LESTE	3	MP
SEG	12:36	P-18	18	OHE	1:35	HGP	0	0	MARLIM LESTE	3	GP
SEG	12:48	PCH1	18	OHU	1:13	HGP	0	0	MARLIM LESTE	3	GP
SEG	13:00	Slot livre	0	OHG	-	-	-	-	-	3	GP
SEG	13:12	P-48	18	OHF	1:30	HGP	0	0	MARLIM SUL	3	GP
SEG	13:48	P-53	18	JBK	1:39	HGP	0	0	MARLIM LESTE	3	GP
SEG	14:00	P-35	18	OHI	1:32	HGP	0	0	MARLIM LESTE	3	GP
SEG	14:24	Slot livre	0	OHO	-	-	-	-	-	3	GP
SEG	13:24	Slot livre	0	OHJ	-	-	-	-	-	3	MP
SEG	13:36	P-20	11	OHC	1:28	HMP	1	1	MARLIM NORTE	3	MP
SEG	14:12	P-19	11	OHB	1:32	HMP	1	1	MARLIM LESTE	4	MP
SEG	14:48	UMLI	18	OHU	1:32	HGP	0	0	ALBACORA	4	GP
SEG	15:00	UMPA	18	OHE	1:29	HGP	0	0	MARLIM LESTE	4	GP
SEG	15:12	P-47	17	OHG	1:29	HGP	1	1	MARLIM NORTE	4	GP
SEG	15:36	Slot livre	0	OHF	-	-	-	-	-	4	GP
SEG	16:12	Slot livre	0	JBK	-	-	-	-	-	4	GP
SEG	16:24	Slot livre	0	OHI	-	-	-	-	-	4	GP
SEG	16:48	Slot livre	0	OHO	-	-	-	-	-	4	GP

Para facilitar a visualização dos dados apresentados na Tabela 5, é utilizada uma versão resumida mostrada na Tabela 6. Esta visão é chamada de “tabela visual”.

Tabela 6 – Modelo de Visualização da programação, chamado de “tabela visual”

HORÁRIO	U.M	VAGAS	PREFIXO	ACFTS	TEMPO	RETORNO	TRILHO
07:00	PCH2	11	OHJ	MP1	01:11	08:56	00:04
07:12	PNA2	11	OHC	MP2	01:14	09:11	00:01
07:24	P-20	11	OHB	MP3	01:28	09:37	00:11
07:36	SS57	17	OHE	GP1	01:37	09:58	00:02
07:48	P-32	17	OHU	GP2	01:21	09:54	00:18
08:00	UMLI	18	OHG	GP3	01:32	10:17	00:07
08:12	SS85	18	OHF	GP4	01:40	10:36	00:00
08:24	UMPA	18	JBK	GP5	01:29	10:38	00:10
08:36	Slot livre	18	OHI	GP6	-	11:00	01:40
08:48	P-51	18	OHO	GP7	01:36	11:09	00:03
09:00	P-26	12	OHJ	MP1	01:35	11:20	00:04
09:12	P-19	11	OHC	MP2	01:32	11:29	00:07
09:48	P-37	11	OHB	MP3	01:31	12:04	00:08
10:00	P-56	18	OHE	GP1	01:43	12:28	00:08
10:12	PGP1	18	OHU	GP2	01:11	12:08	00:40
10:24	P-40	18	OHG	GP3	01:33	12:42	00:18
10:36	P-43	18	OHF	GP4	01:28	12:49	00:23
10:48	Slot livre	18	JBK	GP5	-	13:48	02:15
11:00	NS30	18	OHI	GP6	01:11	12:56	01:04
11:12	P-51	18	OHO	GP7	01:36	13:33	00:51
11:24	PNA2	11	OHJ	MP1	01:14	13:23	00:01
11:36	PCP1	11	OHC	MP2	01:11	13:32	00:04
12:12	PNA1	11	OHB	MP3	01:14	14:11	00:01
12:36	P-18	18	OHE	GP1	01:35	14:56	00:04
12:48	PCH1	18	OHU	GP2	01:13	14:46	00:02
13:00	Slot livre	18	OHG	GP3	-	15:12	01:27
13:12	P-48	18	OHF	GP4	01:30	15:27	00:09
13:48	P-53	18	JBK	GP5	01:39	16:12	-
14:00	P-35	18	OHI	GP6	01:32	16:17	00:07
14:24	Slot livre	18	OHO	GP7	-	16:48	01:39

13:24	Slot livre	12	OHJ	MP1			03:27
13:36	P-20	11	OHC	MP2	01:28	15:04	01:47
14:12	P-19	11	OHB	MP3	01:32	15:44	01:07
14:48	UMLI	18	OHU	GP2	01:32	16:20	00:31
15:00	UMPA	18	OHE	GP1	01:29	16:29	00:22
15:12	P-47	17	OHG	GP3	01:29	16:41	00:10
15:36	Slot livre	18	OHF	GP4			01:15
16:12	Slot livre	18	JBK	GP5			00:39
16:24	Slot livre	18	OHI	GP6			00:27
16:48	Slot livre	18	OHO	GP7			00:03

Não é difícil perceber a dificuldade de se observarem ociosidades neste tipo de visualização. Contudo, ao empregar a representação gráfica, onde cada voo é representado como um objeto, dentre vários outros, alocados num espaço limitado, é possível e fácil perceber as lacunas na programação, conforme se pode observar na através da área branca da Figura 16. Cabe destacar que se trata da programação real utilizada nos voos de segunda-feira, antes da otimização da programação.

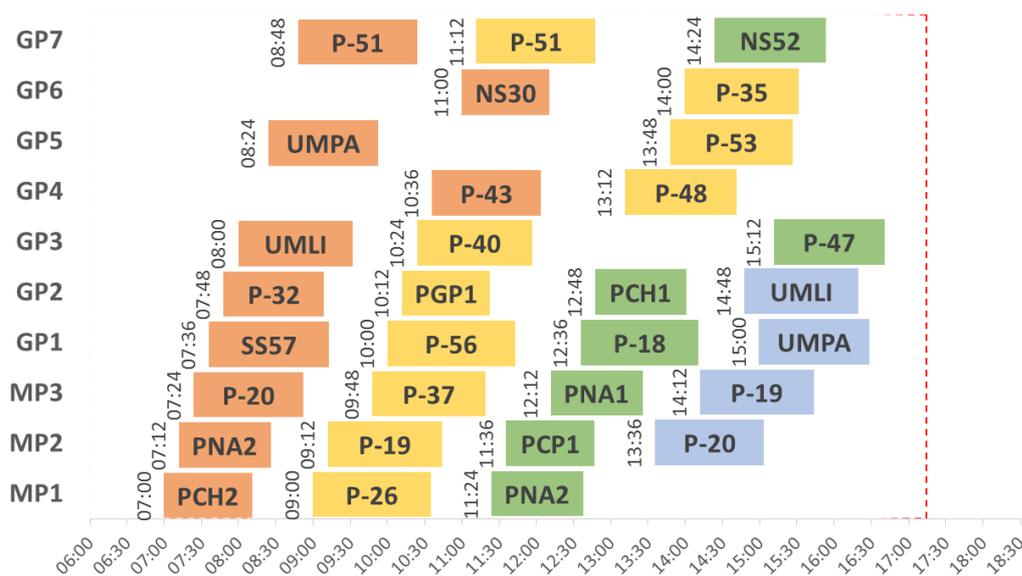


Figura 16 - Visualização por representação gráfica – ineficiências visíveis

Fonte: O autor (2020)

Através deste gráfico, é possível perceber que o espaçamento entre decolagens dos primeiros voos de cada aeronave faz com que a janela disponível para o décimo helicóptero tenha 01h48min a menos do que a janela do primeiro. Também é possível observar que os espaçamentos entre voos sucessivos numa mesma aeronave possuem durações irregulares, o que representa uma possível perda de capacidade operacional. Um último ponto que vale destaque é que, de maneira geral, os tempos entre os últimos pousos e a real limitação de pouso (limite do pôr-do-sol) de maneira geral são insuficientes para a alocação de um novo voo,

mas que se a programação for mais bem organizada será possível alocar mais voos nesta tabela. Tal fato é visto na programação dos helicópteros MP2, MP3, GP1, GP2, GP3, GP5, GP6 e GP7. No MP2, por exemplo, é possível observar que, caso haja uma demanda adicional durante o dia, este helicóptero poderá ser utilizado para cumprir uma missão que seja curta, porém não é possível alocar um voo longo dado o espaço reduzido até o limite.

A Figura 17, feita após o processo de otimização já deixa claro ao leitor que a solução final contém menos ineficiências na programação, conforme percebe-se graficamente a seguir. É importante observar também que esta representação proporciona a realização de ajustes na programação de forma muito mais intuitiva e direta, a partir da simples observação e análise dos “espaços” disponíveis.

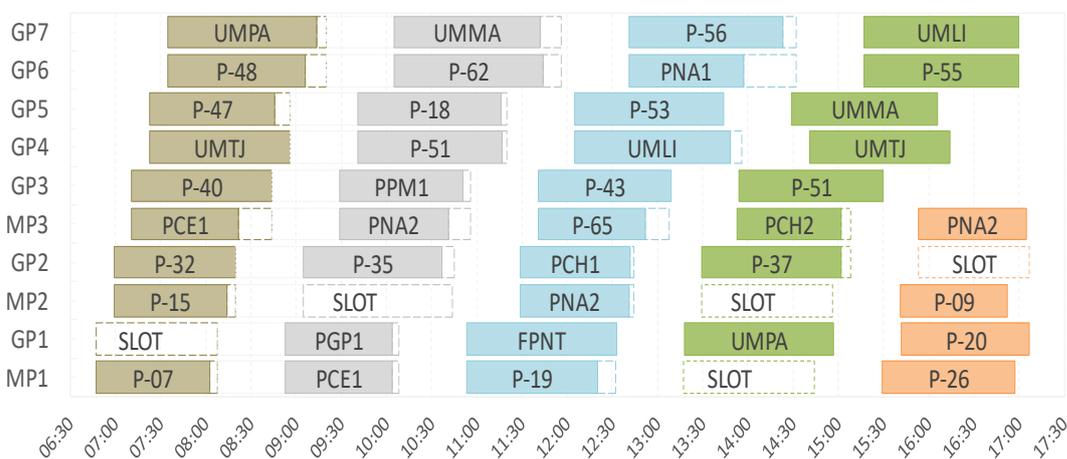


Figura 17 - Versão final da visualização da programação – ociosidades minimizadas

Fonte: O autor (2020)

Esta nova forma de apresentação, fruto da representação espacial da solução do problema da mochila, apesar de parecer bastante simples, permitiu facilitar a observação de lacunas e viabilizar ajustes simples em pouco tempo de análise. É possível perceber que apenas utilizando este modelo gráfico já seria possível melhorar a solução logística, obviamente sem garantia de otimalidade, mas que dispensaria até mesmo a resolução matemática para a obtenção de soluções melhores.

4.4

Um exemplo do replanejamento de tabela de voo

Ao empregar o modelo matemático proposto na geração das tabelas de voo, foi percebido que o maior ganho obtido não era a solução em si. O processo de planejamento foi modificado a partir deste trabalho, e tais mudanças representaram maior ganho para a logística do que uma simples rodada do modelo. A seguir, as mudanças são apresentadas em maiores detalhes.

Conforme foi visto na seção 1.7, o objetivo secundário do trabalho era viabilizar uma maior quantidade de voos em Farol de São Tomé, base mais próxima das unidades marítimas, portanto mais econômica, transferindo para tal voos de Campos e de Macaé. A Figura 18 mostra como era a programação de voos em São Tomé nas segundas-feiras, antes da revisão do planejamento. É importante destacar que havia 31 voos alocados em 10 helicópteros.

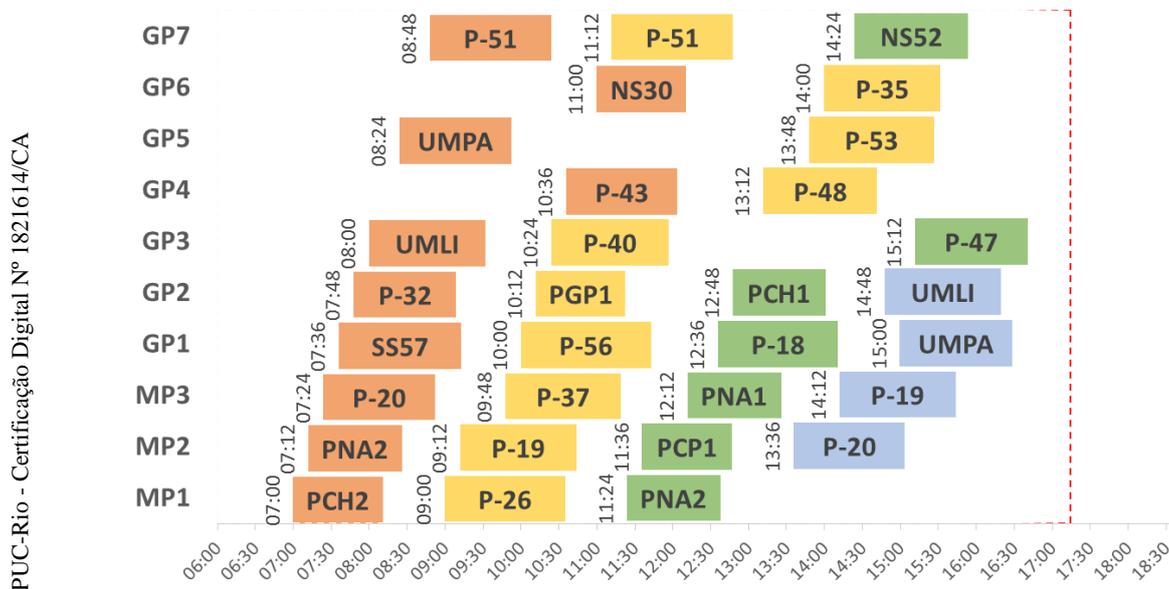


Figura 18 - Programação original – 31 voos alocados em 10 helicópteros

Fonte: O autor (2020)

Ao conjunto dos voos mostrados na Figura 18, foram somados outros voos oriundos dos aeroportos de Campos e Macaé, que compuseram a demanda total a ser alocada na janela de São Tomé. Foi utilizado um modelo matemático sem a restrição de alocação por tipo de helicóptero (que veio a ser adicionada posteriormente). Desta forma, o modelo foi rodado em 2 etapas diferentes, onde os helicópteros de Médio e Grande portes foram separados em dois blocos distintos.

Além disso, foram deixados dois helicópteros de grande porte sem programação, para cumprir programações extemporâneas e imprevistos operacionais. Esta estratégia é chamada de “aeronaves de *pool*” pelas equipes de

planejamento. Será visto adiante que esta prática de deixar aeronaves sem programação (em *pool*) também foi revista neste estudo de melhoria do processo. O resultado pode ser visto na Figura 19.

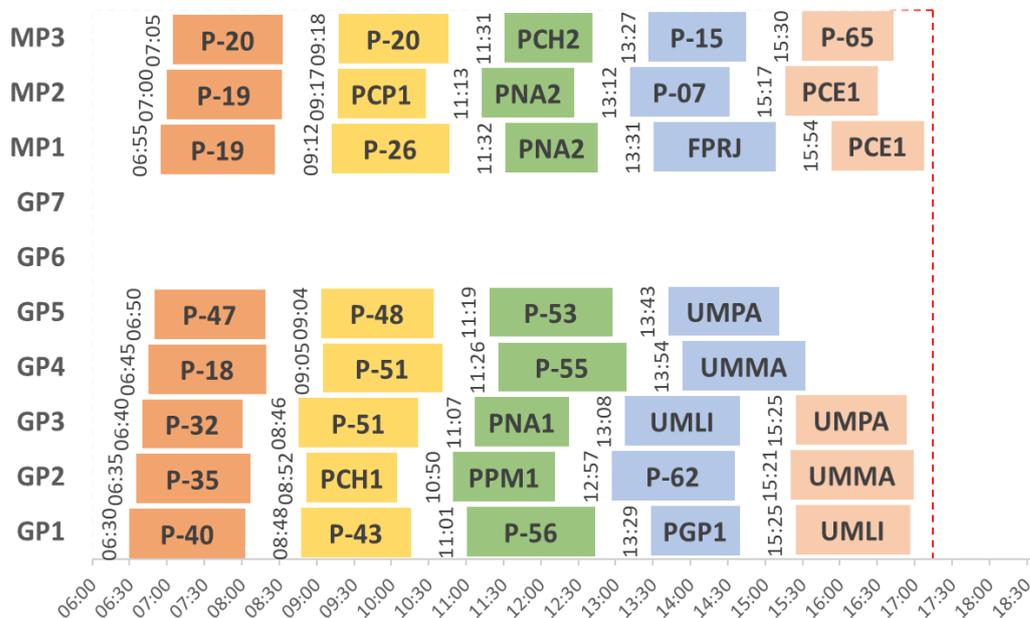


Figura 19 - Programação revisada – 38 voos alocados em 8 helicópteros

Fonte: O autor (2020)

Vale ressaltar que a solução encontrada possui 38 voos na grade, o que representa um aumento de 22,6% em relação à solução anterior. É importante destacar que nesta etapa as decolagens foram defasadas em apenas cinco minutos a cada helicóptero, pois a nova proposta de fluxos no aeroporto ainda não havia sido concluída. Quando os processos no aeroporto foram adequados para permitir esta mudança, optou-se por deixar doze minutos a cada dupla de aeronaves. A estratégia de lançamento de duplas de helicópteros foi repetida ao longo do dia para os demais voos. Além disso, o horário da primeira decolagem foi novamente alterado para 06h48, em acordo com os clientes. Os horários dos voos foram ajustados para contemplar esta nova realidade operacional, conforme se observa na Figura 20.

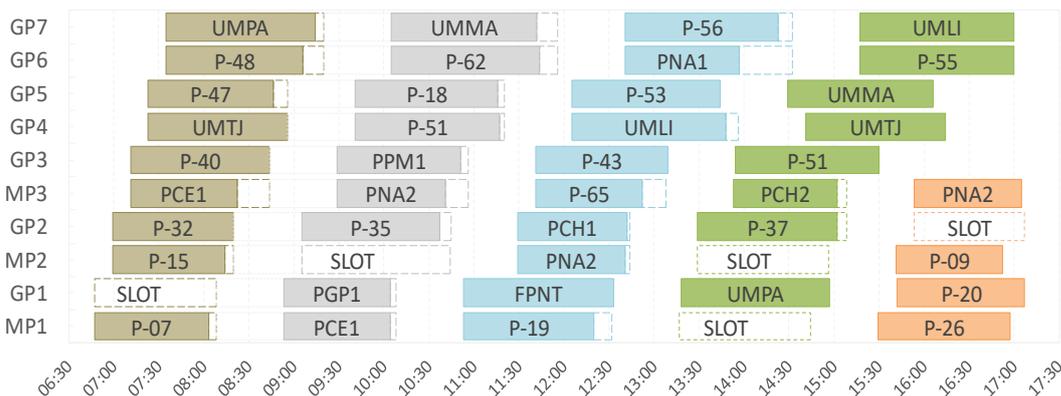


Figura 20 - Programação final após ajustes – 41 voos alocados em 10 helicópteros

Fonte: O autor (2020)

Nesta programação final, foi possível alocar 41 voos nos mesmos 10 helicópteros, ainda deixando quatro janelas disponíveis para demandas extemporâneas e imprevistos operacionais. Ao final do planejamento da tabela, esta nova programação com 41 voos teve um acréscimo de 32% na quantidade de voos executados diariamente, comparando-se com os 31 voos realizados anteriormente.

Mais do que os ganhos econômicos oriundos da melhor distribuição de voos no aeroporto mais econômico, este trabalho está focado nas melhorias no processo de planejamento no nível tático e operacional da programação de voos offshore. Nas seções a seguir, serão detalhados os resultados obtidos e os ganhos intangíveis que facilitarão as novas revisões.

5

Resultados

5.1

Ferramenta elaborada e testes realizados

Como forma de viabilizar o cálculo da solução ótima para o problema descrito na seção 3.4, foi elaborada uma ferramenta no Microsoft Excel®, utilizando um *add-in* chamado OpenSolver (Mason, 2011). Este *add-in* trabalha com o otimizador CBC (Forrest *et al*, 2018), que utiliza o método *Branch-and-Cut*, implementado na biblioteca COIN-OR (*Computational Infrastructure for Operational Research*) (Lougee-Heimer, 2003). Utilizar esta ferramenta foi necessário para resolver com maior agilidade problemas de programação inteira com um número maior de variáveis.

A ferramenta desenvolvida possui características muito semelhantes ao Solver padrão do Microsoft Excel®, apesar do processamento interno ser diferenciado. Na planilha são inseridos todos os voos que devem ser atendidos num determinado dia, seus respectivos tempos totais de ida e volta (ver Figura 13), e também indicar qual o porte de helicóptero que deverá atender a esta missão. Também fazem parte do conjunto de dados de entrada os horários das primeiras decolagens de cada janela temporal, o tempo entre voos e o horário limite do pôr-do-sol a ser considerado. É necessário indicar quantos helicópteros de cada tipo estarão disponíveis para o cumprimento das missões. Quanto aos dados de saída, a quantidade de variáveis de decisão, definida como N_{var} , é calculada em função da quantidade de elementos nos conjuntos V , J e K , da seguinte forma:

$$N_{var} = |J| \cdot (|V| + |K| + 1) \quad (17)$$

A partir da equação (17) percebe-se que para o caso em questão não seria viável a utilização do solver padrão do Excel, que é limitado em no máximo duzentas variáveis de decisão. O caso base deste estudo possui dez janelas, algo em torno de quarenta voos e dois tipos de helicópteros, totalizando cerca de quatrocentas e vinte variáveis de decisão.

Como dados de saída da ferramenta de cálculo, tem-se a seleção dos voos alocados em cada janela, além da indicação de qual tipo de helicóptero será alocado a cada uma das janelas abertas. De posse destes dados pode-se observar quais voos não foram alocados em nenhuma janela. Este é um ponto muito interessante, pois foi justamente a partir das listas de voos não alocados que foi percebida a necessidade por soluções de ampliação das janelas operacionais.

Foi visto que aguardar até a obtenção do resultado ótimo pode levar um tempo desnecessariamente grande. A depender da complexidade do problema é possível que o tempo para a obtenção do ótimo global seja relativamente pequeno, porém é possível que para cenários mais complexos o tempo para a realização dos cortes seja muito grande. Após serem feitos inúmeros testes para a verificação dos parâmetros de cálculo, foi percebido como uma boa prática limitar em cerca de sessenta segundos o tempo limite para o retorno da melhor solução obtida neste prazo. Especificamente para o caso de São Tomé, que possui dez helicópteros, aguardar muito mais do que um ou dois minutos para a obtenção do melhor resultado não traz mais benefício prático na adequação da tabela. Uma avaliação de 3 cenários diferentes é mostrada na Figura 21.

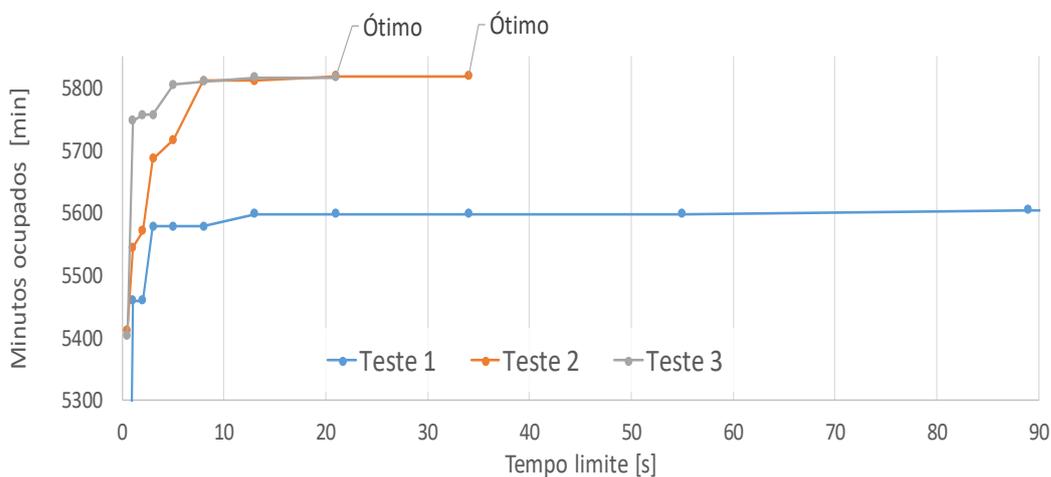


Figura 21 – Estudo do tempo gasto no cálculo no resultado obtido
Fonte: O autor (2020)

Pela grande velocidade na obtenção de cada resultado, o tempo que antes era gasto na geração de uma tabela factível foi gasto na realização de refinamentos pela equipe de planejamento. Por exemplo, de posse de um resultado com apenas um voo de sobra, ou seja, não alocado em alguma janela, todos os esforços foram feitos

no sentido de tentar viabilizar a operação com um voo a menos. Soluções possíveis envolveram a mudança do dia da semana para o cumprimento da missão, a mudança do tipo de helicóptero, tentativas de antecipação das decolagens, e até mesmo a avaliação da redução da oferta de voos semanais. Como o objetivo deste trabalho é a apresentação das soluções estruturantes para o planejamento das tabelas de voo, não será dada ênfase nas soluções operacionais em detalhes, apesar de terem sido muito importantes para o caso específico de revisão de tabelas do Heliporto de São Tomé.

Para o planejamento de bases mais distantes, será visto nas seções 5.3.4 e 5.3.5 que foram alocadas nestas com prioridade os *slots* livres de programação, e que estes ficaram preferencialmente para o final do dia. Para estes casos, além de simplesmente rodar o algoritmo, foram feitos testes sucessivos para avaliar os horários mais cedo que seria possível terminar a operação do dia. Daí que foi gerada a proposta de alocação de *slots* livres para o final do dia, mantendo a capacidade de recuperação ao longo do dia.

É importante mencionar também que a ordem da realização dos voos não altera o resultado, desde que estejam alocados no mesmo helicóptero. Assim, o analista pode alterar a sequência de modo a obter uma melhor distribuição das decolagens ao longo do dia, mas este trabalho foi feito manualmente.

5.2

Necessidades e Oportunidades identificadas

Ao buscar a solução para o problema de alocação de voos de forma otimizada nas janelas temporais de cada helicóptero, foi percebido que o uso da formulação deste problema de programação como um Problema de Múltiplas Mochilas gerou três efeitos imediatos que, apesar de parecerem triviais, foram cruciais para o desenvolvimento de uma estratégia de programação logística muito mais abrangente e útil. Os efeitos imediatos foram os seguintes:

- Criação de uma forma de representação gráfica das soluções;
- Alta velocidade na obtenção de uma solução viável para o problema;
- Alto fator de compactação dos voos nos espaços disponíveis.

Cada um desses efeitos imediatos gerou consequências subsequentes e importantes para o desenvolvimento do problema. A capacidade de observar graficamente a programação de voos, o sequenciamento do lançamento de helicópteros e os espaços entrevoos, possibilitou aos analistas perceberem de forma imediata possíveis ineficiências operacionais que antes não eram facilmente detectáveis pelos analistas. Isso foi possível sem a realização de cálculos de horários, mas apenas através da percepção visual imediata.

Outro efeito interessante é a alta velocidade na obtenção de uma solução viável. A realização desta tarefa manualmente é lenta e por isso os analistas se deparam com uma situação difícil: quanto mais demorado for o processo, mais ajustes serão solicitados ao longo do planejamento e, conseqüentemente, mais tempo demandará para a conclusão do trabalho. Isso acontece, pois, várias unidades marítimas, diferentemente dos aeroportos, mudam de lugar. Além disso, a demanda também pode variar de acordo com o tipo de atividade que está sendo realizada. Este ciclo quase interminável de adaptações e mudanças teve ganho expressivo quando uma solução viável para o problema é gerada em poucos minutos. Isso possibilita que a equipe de planejamento possua uma solução adequada em tempo hábil antes que novas mudanças demandem ajustes na programação.

Um terceiro efeito interessante ao ser utilizada uma formulação matemática em auxílio à programação é que de fato ocorre um ajuste preciso dos voos nas janelas operacionais. A otimização faz com que os espaços ociosos sejam inteligentemente preenchidos através de uma distribuição seletiva de voos. Como consequência deste alto fator de empacotamento os últimos pousos podem ocorrer muito próximos do pôr-do-sol.

Combinados ou isoladamente, a partir destes efeitos decorrem necessidades ou oportunidades específicas, que foram tratadas ou aproveitadas para gerar as soluções propostas neste trabalho. Estas soluções se tornaram a parte mais relevante do estudo em questão, pois possibilitaram a criação de uma nova perspectiva para a operação das aeronaves, e permitiram robustecer o processo de planejamento de voos, buscando sempre a redução dos custos operacionais. Nas seções a seguir, tais propostas de solução serão descritas em mais detalhes.

Ainda sobre as necessidades e oportunidades decorrentes dos efeitos do uso de um modelo de programação, pode-se afirmar que a percepção visual e clara das oportunidades de alocação de voos adicionais gerou um incômodo positivo nos

analistas que motivou o trabalho de busca por ampliação das janelas de voo. Esta iniciativa emerge respaldada pela proposta da programação matemática, pois seria inútil ganhar poucos minutos nas janelas operacionais de cada helicóptero e não possuir ferramentas para conseguir capturar os ganhos decorrentes desta ampliação. Não é difícil perceber que seria inviável a captura de ganhos expressivos decorrentes da ampliação das janelas utilizando o método de programação manual, conforme será detalhado mais à frente.

Uma outra necessidade surgente da utilização desta proposta de programação matemática advém do alto fator de compactação dos voos nas janelas operacionais. Como a solução do problema matemático encontrada a partir do método de otimização é geralmente superior às soluções encontradas pelo método manual de alocação dos voos, os espaços disponíveis nas janelas operacionais são preenchidos inteligentemente até o limite onde as restrições se tornem ativas, ou estejam muito perto disso. Isso faz com que os tempos ociosos sejam escassos nos vários helicópteros, demandando extrema rigidez operacional. Como consequência disso, as intercorrências operacionais na execução dos voos ao longo do dia podem, com maior frequência, se tornar eventos que inviabilizem a realização dos voos subsequentes no mesmo dia. Poderia ocorrer, por exemplo, uma impossibilidade da realização do último voo em função de pequenos atrasos nos voos antecedentes. Este voo impossibilitado de ocorrer teria que ser transferido para o dia seguinte, os passageiros a embarcar deveriam ser acomodados em hotéis e aqueles que estão embarcados e desceriam para cumprir a folga deveriam aguardar o dia seguinte, ao custo de insatisfações pessoais e horas extras. Este é possivelmente o maior transtorno operacional para o transporte aéreo offshore exceto, obviamente, a ocorrência de um acidente ou incidente aeronáutico.

No exemplo hipotético ilustrado na Figura 22 a programação planejada é factível e ainda possui folga de dez minutos com relação ao limite. No entanto, se ocorrerem pequenas variações de apenas cinco minutos no 2º, 3º e 4º voos, por exemplo, haverá como consequência a impossibilidade de realização do último voo. Os dez minutos de folga terão sido consumidos pelos pequenos atrasos e o último voo sequer decolaria para cumprir a missão pois excederia o limite do pôr-do-sol em apenas cinco minutos. Vale destacar que na aviação o indicador de pontualidade de voos (*OTD – On Time Departure*) despreza atrasos de menos de 15 minutos após o horário planejado para voos domésticos. Ou seja, mesmo uma realização

considerada pontual em todos os voos realizados não poderia ser totalmente executada em função de pequenas variações ao longo do dia. Na Figura 22 é possível perceber que o último voo não poderia ser executado.

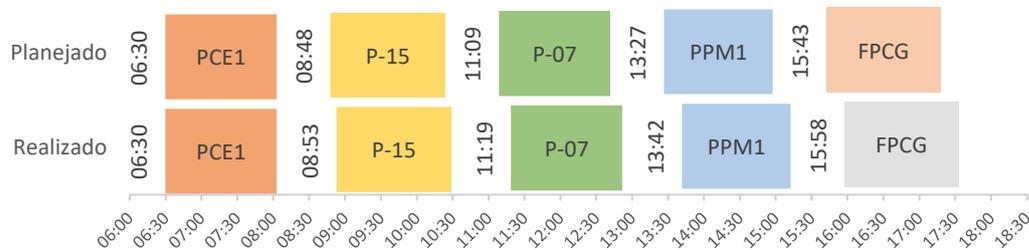


Figura 22 - Ilustração do efeito das pequenas variações nos horários planejados

Fonte: O autor (2020)

Como consequência deste alto fator de compactação e das reduzidas margens e ociosidades, surgem duas necessidades. Uma das necessidades é a demanda por novas estratégias de soluções de continuidade operacional, para viabilizar a máxima exequibilidade de voos mesmo com o cenário de incertezas de quando e como uma indisponibilidade operacional irá ocorrer. Esta poderia ser resumida como uma forma planejada de lidar com as incertezas de modo que a operação seja realizada em sua totalidade, mesmo em cenários adversos. Outra, é a necessidade de uma abordagem probabilística da tabela de voos, que traga consigo uma forma de analisar a exequibilidade da programação de forma não determinística, mesmo que tal abordagem seja apenas qualitativa, como será visto adiante.

Além das necessidades mencionadas, surge também uma oportunidade decorrente da utilização da programação matemática. Esta é fruto da alta velocidade na obtenção de uma solução viável, especialmente quando comparada ao método manual. Esta agilidade possibilita que o analista refaça os cálculos várias vezes para encontrar soluções ainda melhores. Como se trata de um problema que envolve negociação com vários clientes internos, a cada nova interação as condições podem ser novamente alimentadas no modelo e uma nova solução viável estará disponível em poucos minutos.

A Figura 23 mostra um encadeamento lógico desde a formulação do problema até o mapeamento das necessidades e oportunidades que foram devidamente tratadas e exploradas para dar origem às soluções implementadas neste trabalho.

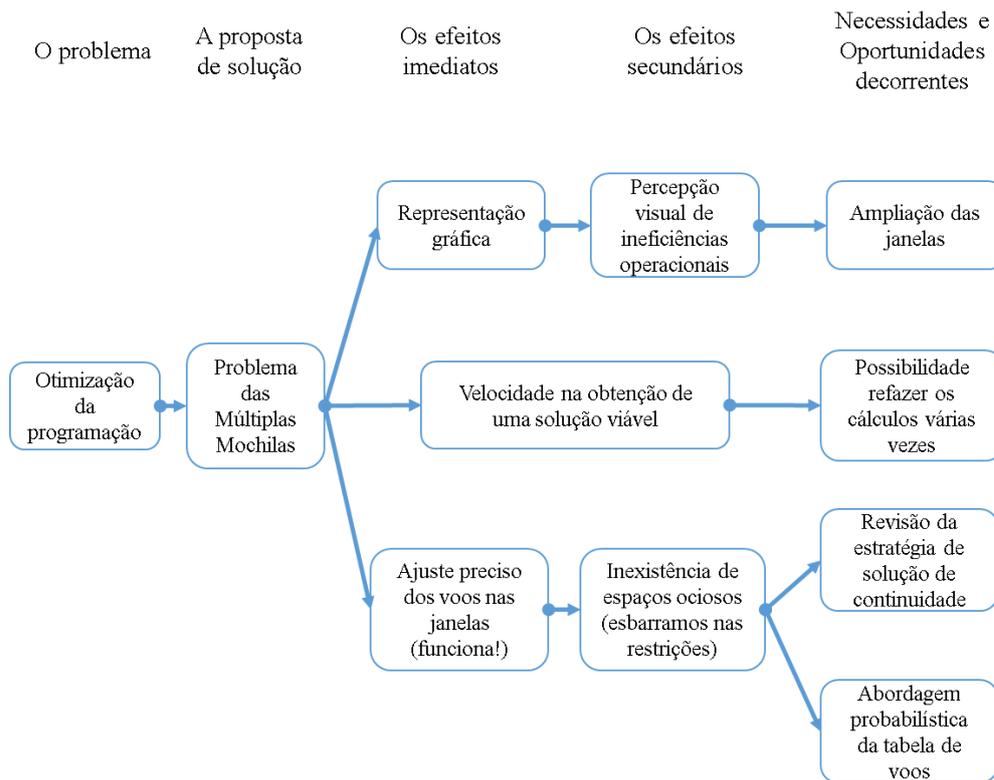


Figura 23 - Encadeamento do fluxo de desenvolvimento do trabalho

Fonte: O autor (2020)

5.3

Soluções implementadas no processo de planejamento

As quatro necessidades e oportunidades decorrentes da proposta de solução para o problema da programação de voos foram exploradas para que fossem propostas as soluções apresentadas nas seções seguir.

5.3.1

Antecipação de decolagens e sequência de lançamentos

Ao ser utilizada a abordagem do problema da mochila, não obstante a modelagem e a busca por uma solução viável do problema matemático, também foram avaliadas formas de como aumentar a capacidade de cada mochila. A busca por “fazer caber” não se limitou ao campo da busca por solução numérica, mas envolveu também ações de gestão e estratégias operacionais, buscando a ampliação da capacidade logística.

Antes deste estudo, a primeira decolagem ocorria às 07h00min da manhã. Além disso, adotava-se um espaçamento de doze minutos entre decolagens sucessivas, por conta do tempo necessário para a realização de procedimentos de embarque e taxiamento das aeronaves. Estes procedimentos faziam com que a janela do último helicóptero fosse 01h48min menor do que a do primeiro.

O horário da primeira decolagem foi antecipado inicialmente para 06h30min, depois ajustado para 06h48min. Somente esses doze minutos de diferença aplicados aos dez helicópteros já teriam sido suficientes para que a disponibilidade total daquela base aérea fosse aumentada em duas horas (12 minutos x 10 helicópteros).

Além desta antecipação, o fluxo de passageiros foi revisado de tal forma que o processo de embarque foi agilizado, permitindo o processamento de equipes para ocupar até dois helicópteros a cada doze minutos. A partir da implementação desta melhoria, foi possível viabilizar o lançamento de dois helicópteros a cada doze minutos, ao invés de lançamentos únicos. Cabe destacar que, apesar de tecnicamente não ser viável realizar decolagens perfeitamente simultâneas, foi considerado, para efeitos de cálculos e de programação, que as decolagens ocorrem no mesmo minuto. Esta é uma boa aproximação pois as aeronaves já ficam prontas no mesmo momento e são liberadas e lançadas numa sequência curta, gerando pouca diferença entre o horário previsto e o executado.

Combinadas, as duas estratégias de ampliação das janelas permitiram um aumento da disponibilidade total da base em sete horas, conforme detalhamento mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Detalhamento dos ganhos de ampliação de janela em cada helicóptero

Helicóptero	Decolagem anterior	Decolagem otimizada	Ampliação individual de janela
1	07:00	06:48	00:12
2	07:12	06:48	00:24
3	07:24	07:00	00:24
4	07:36	07:00	00:36
5	07:48	07:12	00:36
6	08:00	07:12	00:48
7	08:12	07:24	00:48
8	08:24	07:24	01:00
9	08:36	07:36	01:00
10	08:48	07:36	01:12
			Total = 07:00

Fonte: O autor (2020)

É importante destacar que este tipo de iniciativa parece bastante óbvia, mas somente foi possível implementar com sucesso graças à utilização do modelo matemático, por mais estranho que isso possa parecer. O motivo é simples: os analistas, acostumados a trabalhar com as planilhas mostradas na seção 4.3, não conseguiam perceber ganhos operacionais na antecipação das decolagens, pois os poucos minutos ganhos com esta estratégia não viabilizam nem um voo sequer isoladamente, de tal forma que a antecipação não era útil, na prática.

O ganho real com este tipo de estratégia somente foi viável por conta da abordagem matemática, pois a partir dela a ferramenta computacional é capaz de realizar uma alocação inteligente dos voos nos helicópteros disponíveis, fazendo uso de fato de cada minuto ganho. Por este motivo tal estratégia viabilizou ganhos de capacidade logística.

5.3.2

Aumento da frequência de revisões de tabelas

A geração das tabelas de voo com o horizonte de planejamento de um ano carrega dois problemas distintos. Um deles diz respeito ao fato de que a tabela deve ser viável em todo o horizonte temporal. Isso demanda que o planejamento deva ser feito para a menor janela possível, fazendo com que a programação seja viável nos meses de mínimo pôr-do-sol, e conseqüentemente tenha excedente de janelas operacionais nos meses de pôr-do-sol mais tardes. Ao analisar em detalhes a amplitude da oscilação destes horários ao longo de um ano, é possível perceber que se trata de uma variação da ordem de 01h20min, entre o valor mínimo e máximo.

O outro problema reside no fato de que a operação de exploração de produção de petróleo tem demandas variáveis ao longo do tempo. Uma sonda de perfuração, por exemplo, muda de posição geográfica a cada período de aproximadamente dois meses. Unidades de manutenção e serviços, por exemplo, tem periodicidades da ordem de uma centena de dias. Isso gera uma demanda de alterações e ajustes em períodos curtos. É importante ressaltar que a mudança de uma unidade isoladamente não gera necessidade de refazer toda a tabela de voos, mas a combinação de várias pequenas mudanças ao longo dos meses faz com que as boas condições técnicas no início da operação de uma nova tabela se percam com o

passar do tempo, restando uma programação bastante recortada, com muitas ociosidades e irregularidades.

Esses dois problemas somados à alta velocidade na geração das tabelas de voo ao se utilizar a programação matemática abrem espaço para revisões mais frequentes da programação. A sugestão deste trabalho é que as revisões sejam feitas a cada período de três meses, obedecendo o ciclo das mudanças de estações do ano. Isso permitirá um melhor aproveitamento do período útil alongado nos meses do verão e ajustes mais frequentes nos tempos de voo das unidades marítimas que navegam para locações diferentes ao longo do tempo.

5.3.3

Revisão do modelo matemático para recuperação de voo

Quando um aeroporto tem suas operações interrompidas por um longo tempo, por exemplo, por condições meteorológicas desfavoráveis em terra ou em alto mar, impactando no cumprimento da programação, os voos não executados são transferidos para o dia seguinte. No dia subsequente ao dia de crise de fechamento, haverá um excedente de programação contendo os voos do dia para executar somados àqueles do dia anterior que não puderam ser realizados. Esta é uma situação chamada na operação de “recuperação de voos”, que significa a busca pelo atendimento à demanda represada e o retorno ao regime permanente da programação de voos.

A questão que emerge neste cenário é como alocar o máximo possível de voos atendendo-os com prioridades distintas. Por exemplo, os voos do dia anterior teriam prioridade 1 e os voos do dia em questão prioridade 2. Um outro exemplo possível seria o caso de haver voos que se sobreponham aos voos de troca de turma, como de transporte de autoridades. Nesta situação seria razoável os voos de autoridades terem prioridade 1, os do dia anterior prioridade 2 e os do dia em questão prioridade 3, e assim por diante.

Para cobrir este tipo de situação, ainda mais relevante num cenário onde os espaços vazios e as ociosidades da programação são mais escassas por conta da utilização de um modelo de otimização para a geração da tabela inicial, foi proposta uma atualização do modelo matemático detalhado na seção 3.4. Para isso, foi proposta uma penalidade na função objetivo que reduz o incremento da alocação de

um determinado voo na razão da sua prioridade, ou seja, um voo de prioridade 2 terá a metade do seu tempo apenas na contribuição do valor total a ser maximizado. Isso pode ser visto na equação (18), onde p_v é o valor da prioridade atribuída ao voo v . É importante destacar que $p_v \in \mathbb{N}^*$.

$$\text{Maximizar } z = \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} \left(\frac{t_v + E}{p_v} \right) \cdot x_{vj} \quad (18)$$

Em resumo, sugere-se para os casos de recuperações de voos do dia anterior, onde há necessidade de adoção de prioridades entre os voos, a substituição da equação (8) da seção 3.4 pela equação (18), utilizando-se as mesmas restrições detalhadas naquela seção.

5.3.4

Redistribuição dos *slots* livres em diferentes bases

Conforme foi apresentado na seção 5.3.3, é importante que haja uma capacidade adicional de realização de voos, para que os problemas operacionais possam ser resolvidos e a operação retorne ao regime permanente após um distúrbio. No entanto, ao ser reavaliada a estratégia de atuação nestas situações de algum fechamento do aeroporto ou indisponibilidade operacional, foi proposto que as demandas certas (tabela determinística) deveriam ocupar prioritariamente os *slots* de voos no aeroporto mais econômico. Ao fazer isso, a capacidade de *slots* livres é reduzida, ao mesmo tempo que uma base aérea menos vantajosa economicamente tem sua demanda de voos também reduzida, pois estes foram alocados na base ótima pelo processo de “compactação”.

Esta simples estratégia pode se resumir da seguinte forma: 1) os voos com grande probabilidade de ocorrência (demanda determinística) são priorizados na base de menor custo. 2) Esta base absorve voos de outras menos econômicas e com isso perde *slots* livres para recuperação da operação. 3) Os *slots* livres são alocados nas bases mais distantes, e é montado um esquema de logística terrestre especial para os casos em que houver necessidade de uso dos *slots* livres.

Isso faz com que a operação de rotina tenha seus custos reduzidos, ao mesmo tempo que os voos de recuperação (apenas os que não forem possíveis ser alocados,

após a utilização do modelo adaptado mostrado na seção 5.3.3) passam a ser realizados em uma base mais distante, o que os torna mais dispendiosos. Ao ser utilizada esta solução, a operação mais econômica (alto volume, todo dia) se torna a regra, e a mais cara (eventualidades operacionais) a exceção.

5.3.5

Revisão da alocação dos *slots* livres

Para viabilizar a solução descrita na seção 5.3.4 é necessário que a base mais distante (menos econômica) possua grande disponibilidade de ociosidades para a realização dos voos eventuais. A questão importante que emerge de tal afirmação passa a ser: Como distribuir os espaços vazios ao longo do dia e nos helicópteros disponíveis para maximizar a capacidade de recuperação sem aumento da quantidade de helicópteros?

A necessidade que está sendo tratada neste caso é a revisão da estratégia de solução de continuidade. Já foram descritas as soluções da revisão do modelo para priorização de voos e a redistribuição dos *slots* livres nos aeroportos menos econômicos. Porém, além destas, foram implementadas outras duas propostas: Terminar a operação o mais cedo possível, evitando *slots* livres concomitantes com a operação planejada e deixando-os mais para o final do dia e descontinuar o planejamento de aeronaves sem programação definida (chamadas de “aeronaves de *pool*”).

A Figura 24 mostra como era a tabela de Macaé antes da revisão do planejamento. Nela é possível verificar que havia duas aeronaves sem programação (aeronaves de *pool*), disponíveis ao longo de todo o dia para o caso de haver alguma necessidade de cobertura de uma situação fora do planejamento. Além destas, havia dois *slots* livres em outros dois helicópteros com início e fim por volta de 12h50min e 14h30min, respectivamente.

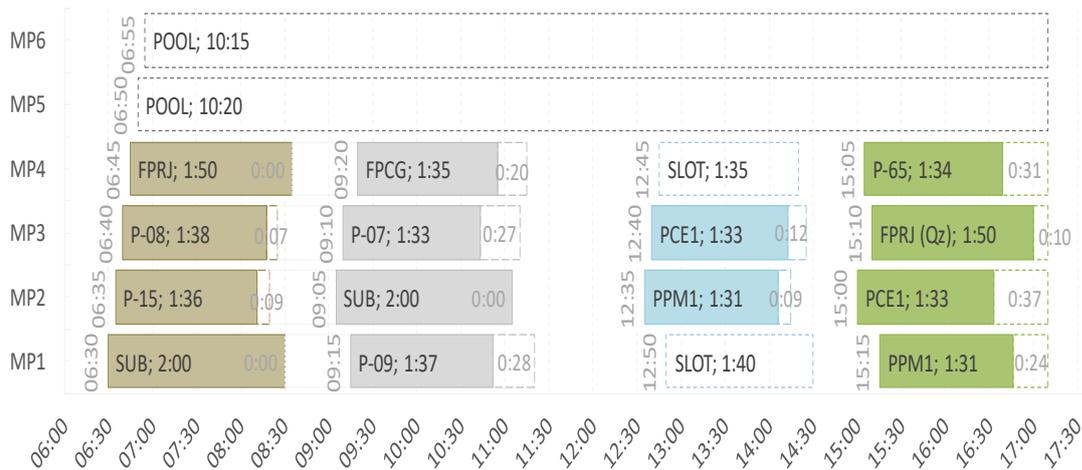


Figura 24 - Programação contendo *slots* livres espalhados e aeronaves de *pool*

Fonte: O autor (2020)

Apesar de ser uma programação com bastante tempo ocioso para absorver as demandas não previstas, com um total de até dez *slots* livres (quatro em cada helicóptero de *pool* mais dois na programação), é simples perceber que uma demanda que surja ao meio-dia, por exemplo, somente terá seis possibilidades de atendimento pois os quatro *slots* livres da parte da manhã já terão sido perdidos. Se a demanda ocorrer por volta das 14h00min, por exemplo, somente restarão duas possibilidades de alocação nos dois últimos *slots* livres das aeronaves de *pool*.

Ou seja, a ociosidade planejada para ser utilizada como solução para os problemas na operação é constantemente reduzida no correr do dia. A solução para manter o fôlego de recuperação por mais tempo ao longo da realização da programação foi alocar os voos planejados para os horários mais cedo, terminando a operação determinística o mais cedo possível. Desta forma, a alocação dos *slots* livres fica preferencialmente para os horários mais tarde, conforme representado na Figura 25.

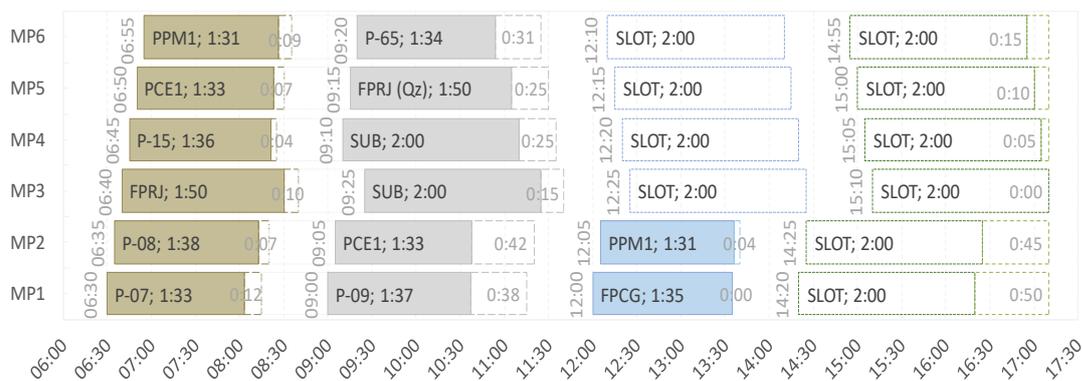


Figura 25 - Programação revisada com *slots* realocados sem aeronaves em *pool*

Fonte: O autor (2020)

Ao ser dada preferência para este procedimento de alocação dos *slots* livres, mantendo-os depois da realização dos voos programados e não deixando aeronaves totalmente sem programação definida (aeronaves em *pool*), a capacidade de recuperação é mantida ao longo do dia, conforme pode-se perceber na Figura 26.

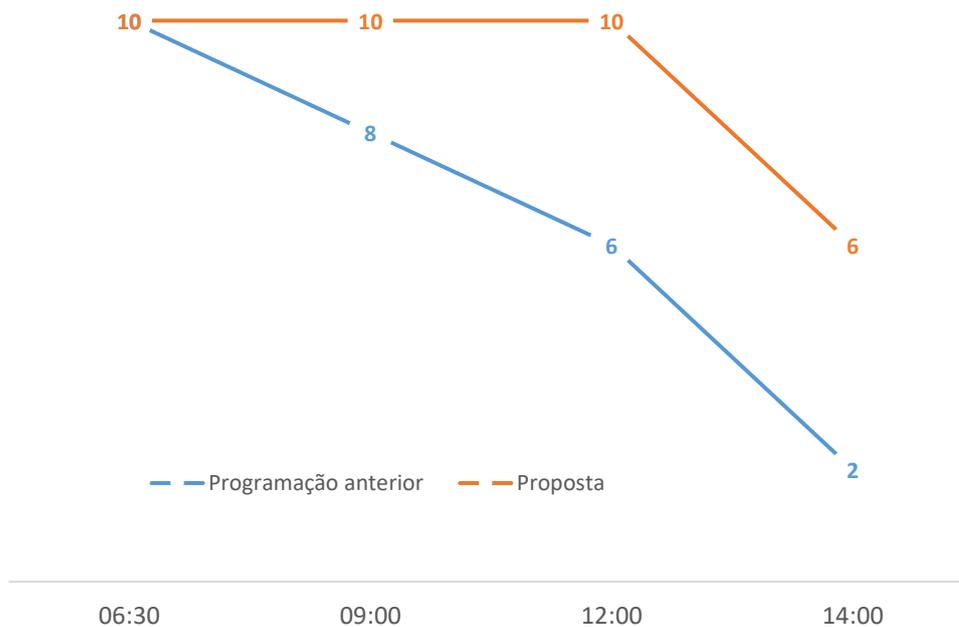


Figura 26 - Comparação da perda da capacidade de recuperação ao longo do dia
Fonte: O autor (2020)

Em resumo, as duas soluções apresentadas são úteis para a manutenção da capacidade da programação amortecer eventuais intercorrências ao longo do dia, sem a necessidade do aumento do quantitativo de helicópteros em operação.

É importante destacar que não foram calculadas, no âmbito deste trabalho, as probabilidades de ocorrência de eventos indesejados, que pudessem demandar uso dos *slots* livres. No entanto a abordagem qualitativa, mesmo que simplificada, se mostrou útil para a melhoria da programação das tabelas.

5.3.6

Ordenação dos voos como função da previsibilidade

Conforme foi apresentado na seção 1.1, há vários tipos de unidades marítimas atendidas pelo transporte aéreo offshore. Algumas delas possuem características mais perenes com relação ao tipo de atividade e aos campos onde operam e outras possuem atividades mais transitórias, pois realizam atividades de curta duração variando sua posição com maior frequência.

As plataformas de produção, por exemplo, podem ficar ancoradas cerca de 30 anos na mesma locação, enquanto embarcações de lançamento de dutos mudam de campo em questão de dias. As sondas de perfuração e intervenção em poços costumam ficar num mesmo poço por cerca de 60 a 90 dias e é comum que, ao concluírem o serviço, iniciem nova atividade em localidade não muito distante, por exemplo, num mesmo campo de petróleo.

As mudanças de locação das unidades marítimas itinerantes geram variações nos tempos de voo, quando continuam sendo atendidas pela mesma base aérea. Quando se trata de uma mudança grande de locação, ao navegar para nova atividade em outra bacia petrolífera, por exemplo, os *slots* de atendimento a estas unidades precisam ser retirados da programação da base atual e incluídos na base futura.

No caso de pequenas variações, as tabelas são normalmente revisadas em função da antecipação ou postergação de horários. Contudo, é comum evitar grandes mudanças de horários nos demais voos para minimizar o impacto no planejamento individual dos serviços a bordo das unidades marítimas, além de reduzir necessidade de alteração na programação de transporte terrestre dos passageiros.

Nas tabelas anteriores, com alta ociosidade, este não era um problema significativo, pois os tempos dilatados ou comprimidos em função das mudanças de locação podiam ser absorvidos sem grandes impactos na programação e sem ultrapassar as restrições de voo. É possível notar tal capacidade de absorção na programação antiga mostrada na Figura 18. No entanto, numa programação otimizada, onde há menos ociosidade e o encadeamento da programação está mais apertado, pode ser que haja necessidade de grandes mudanças nos horários dos voos, o que deve ser evitado. Em resumo, com o passar do tempo, as mudanças de posição das unidades itinerantes começam a gerar 4 possíveis efeitos no planejamento de voos, conforme mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Efeitos na programação em função da mudança de posição

A Unidade Marítima:	Efeito imediato	Consequências
Se move para mais perto do aeroporto	Redução do tempo de voo	É possível manter a tabela de voos sem alteração nos demais horários
Se move para mais longe do aeroporto	Aumento do tempo de voo	Os horários dos voos seguintes são alterados para acomodar a mudança
Vai embora para locação de atendimento por outro aeroporto	Os voos desta unidade são simplesmente retirados da tabela	Geram-se <i>slots</i> livres para cumprir missões de recuperação ou acomodar uma nova unidade itinerante
Demanda iniciar atendimento pelo aeroporto em questão	Os voos desta nova unidade são acomodados na programação	Se houver <i>slots</i> que caibam tais atendimentos, a alocação é imediata. Se não houver, os horários dos demais voos são alterados para permitir alocação da nova unidade

Fonte: O autor (2020)

Como solução para os efeitos negativos decorrentes desta nova realidade, de uma tabela mais ajustada e com pouca ociosidade, foi proposta a ordenação dos voos ao longo do dia como uma função da previsibilidade da locação da unidade marítima. Desta forma, é proposto que os primeiros voos atendam, sempre que possível, às unidades de produção que permanecem por anos na mesma coordenada geográfica. Isso faz com que o restante da tabela esteja protegido de variações de horários nas semanas e meses seguintes.

Logo na sequência destas, é proposto que sejam atendidas as sondas de perfuração, que possuem horizonte de previsibilidade maior do que as embarcações especiais, porém menor que as unidades de produção. Nesta mesma lógica, os últimos voos do dia devem focar no atendimento das grandes embarcações móveis como por exemplo os navios do tipo PLSV (Pipe Laying Support Vessel) e DSV (Diving Support Vessel) que possuem previsibilidade da ordem de poucos dias ou semanas numa mesma posição geográfica. Um exemplo do sequenciamento pode ser visto na Figura 27.

**Figura 27** – Sugestão de sequenciamento em função do tipo de unidade

Fonte: O autor (2020)

5.3.7

Definição dos tempos de *slots* na visão probabilística

Para as eventualidades em que houver algum impedimento de cumprimento de uma missão no horário e na aeronave planejada, como por exemplo, decorrente da indisponibilidade de determinado helicóptero, são deixados na programação alguns “*slots* livres”, que eventualmente poderão ser utilizados nos momentos de necessidade. Já foi sugerido na seção 5.3.4 que sempre que for viável tais *slots* não devem concorrer diretamente com a operação planejada, sendo então alocados nas bases menos econômicas nos casos onde houver conflito com um voo de tabela. Na seção 5.3.5 foi sugerido que tais *slots* deveriam sempre ser alocados no final do cumprimento das programações, uma vez que desta forma é possível manter uma maior capacidade de recuperação ao longo do dia.

Contudo, para definir qual deve ser o tamanho dos *slots* livres de programação, os planejadores alocam tempo suficiente para o cumprimento da maior programação possível, ou seja, com capacidade de realizar o voo mais longo possível.

No entanto, é possível calcular a probabilidade de que seja demandado um voo com uma determinada duração com base nos dados históricos. Para a elaboração do estudo probabilístico dos tempos de voos partindo do heliporto de São Tomé foram considerados todos os voos de atendimento a uma única unidade marítima realizados no ano de 2019. Esta amostra inicial dispõe de 10481 voos, cada um com o respectivo tempo total realizado.

Foi feito um tratamento estatístico simplificado nos dados obtidos, para que os *outliers* fossem extraídos da amostra. Primeiramente foram calculados os quartis da amostra, e com estes dados foi calculada a amplitude interquartil. Após isto, foram obtidos os *outliers* moderados da amostra, considerando-se 1,5 vezes a amplitude interquartil subtraído do valor do primeiro quartil para definição do valor mínimo da amostra sem *outliers* e somado ao valor do terceiro quartil para definição do valor máximo da amostra sem *outliers*. Foram identificados 31 *outliers* e a amostra tratada passou a ter 10450 voos.

Com os dados devidamente tratados, é necessário identificar a distribuição de probabilidade que representa os tempos de voo através de um histograma. Para o cálculo do número de classes necessárias para a representação dos dados foi

utilizada a Regra de Sturges (Sturges, 1926). Foi encontrado um número de classes igual a 14. O tamanho em minutos de cada classe obtido foi de 5 minutos. Foi também elaborado uma visão da distribuição percentual acumulada dos dados para facilitar o entendimento dos dados. Os resultados destas análises são mostrados na Figura 28.

A partir destes dados é possível concluir, por exemplo, que cerca de 96% dos voos possuem duração menor que 105 minutos, ou seja, possuem duração menor que 01h45min. Considerando que as unidades atendidas serão as mesmas, e que serão mantidas as proporções de uso de transporte aéreo por cada uma delas, além da consideração de que as velocidades de voo não terão alteração significativa nos próximos ciclos de planejamento de tabelas de voo, é razoável supor que a probabilidade da duração um voo escolhido aleatoriamente ser menor que 01h45min é de 96%. Da mesma forma, é razoável supor que um *slot* livre de duração planejada de 01h45min possua capacidade de atender a 96% dos imprevistos operacionais.

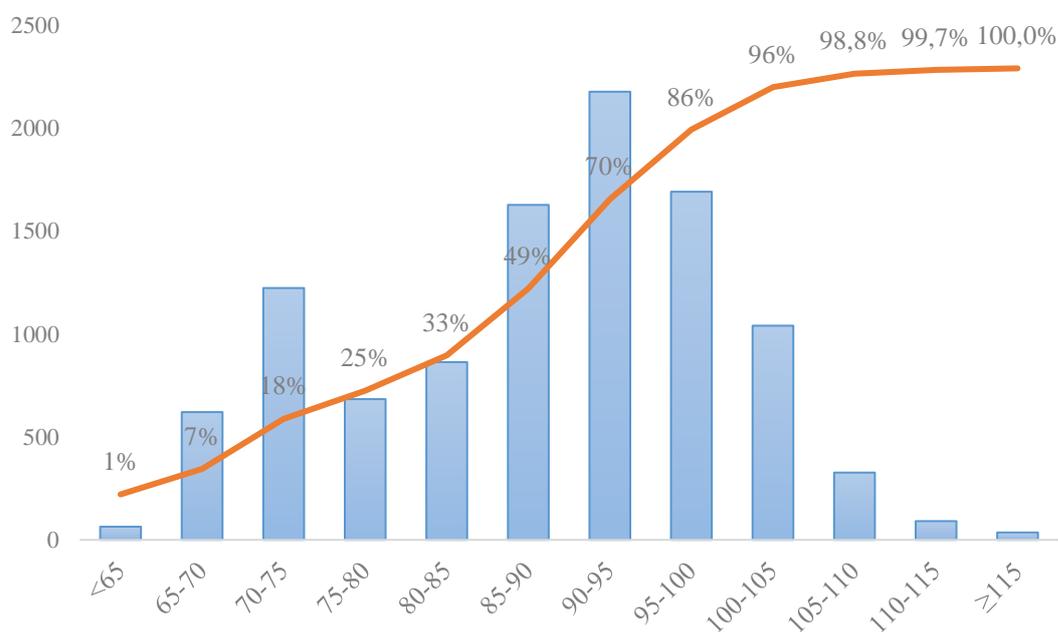


Figura 28 – Histograma de distribuição de tempos de voo

Fonte: Compilação de dados PETROBRAS (2019).

Baseado neste estudo, conforme exemplo mostrado no parágrafo anterior, é proposto que os *slots* livres tenham duração definida com base no percentual de atendimento às possíveis programações, e não apenas no valor máximo teórico de uma programação. Obviamente, os *slots* poderão ter seus tempos majorados para

permitir o cumprimento de operações maiores, mas é sugerido que isto somente seja feito caso os limites de voo daquela base não estejam sendo atingidos, ou seja, quando houver disponibilidades de tempo sem sacrifício da programação de rotina, como é possível observar na Figura 25.

5.4

Esquemático das soluções implementadas

A partir das quatro necessidades e oportunidades decorrentes da proposta de solução para o problema da programação de voos foram sugeridas as soluções detalhadas na seção 5.3. A Figura 29 apresenta uma visão de processo elaborado para que se tenha uma melhor clareza sobre qual foi o encadeamento das ideias desde a proposta de solução para o problema, passando pelos efeitos imediatos e secundários do uso do método escolhido, que geraram necessidades e oportunidades a serem resolvidas ou exploradas, e que culminaram na implementação das várias soluções sugeridas, gerando o resultado final objeto do trabalho.

A Figura 30 contém um detalhamento em forma de fluxograma para facilitar ainda mais o entendimento do encadeamento das ideias.



Figura 29 – Encadeamento das ideias para a proposição das soluções

Fonte: O autor (2020)

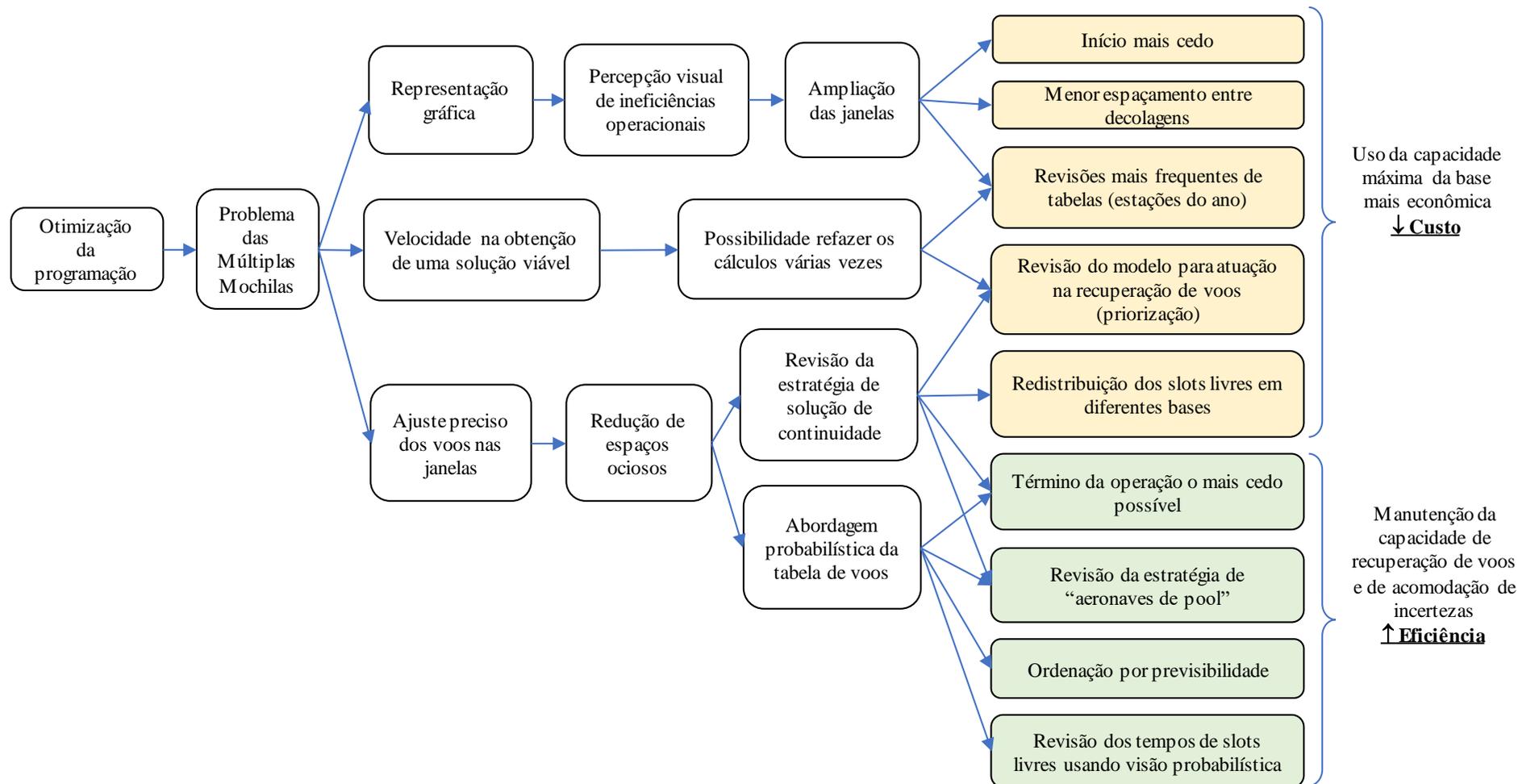


Figura 30 – Encadeamento das ideias para a proposição das soluções

Fonte: O autor (2020)

6

Conclusão

Conforme foi descrito na seção 1.7, o objetivo principal deste estudo é apresentar o desenvolvimento de soluções para redução dos custos da operação aérea, buscando o máximo aproveitamento das aeronaves contratadas, a partir de uma proposta de otimização da programação de voos através da resolução de uma formulação de Programação Linear Inteira, que estende um Problema de Múltiplas Mochilas, respeitando as limitações impostas por regulamentação e necessidades operacionais.

O uso do modelo matemático proposto na seção 3.4, especificamente a solução do problema descrito nas equações de (8) a (16), durante o planejamento tático das operações aéreas para auxílio no processo de elaboração de tabelas de voo garante que haja uma distribuição inteligente de voos numa base mais econômica, garantindo uma alocação otimizada de atendimentos mais curtos. Isto significa necessariamente a redução dos custos variáveis da operação.

Além disso, as soluções apresentadas na seção 5.3 são robustas o suficiente para garantir que haja ganhos para as operações aéreas tanto sob a ótica da redução de custos quanto aumento da eficiência operacional. A proposta de aumento das janelas operacionais (seções 5.3.1 e 5.3.2) aumenta o uso da frota contratada. Como consequência deste aumento da eficiência no uso da frota, é esperado no médio prazo uma menor necessidade de contratação de frota, gerando redução do custo fixo.

O uso do modelo matemático não apenas para planejamento tático, mas também para o planejamento operacional em momentos de recuperação de voos, conforme sugerido na seção 5.3.3 maximiza a quantidade de voos alocados num dia de recuperação. Isso faz com que o problema da recuperação seja resolvido com maior agilidade, gerando o efeito positivo de menor necessidade de contratação de novos helicópteros no médio prazo, possibilitando a redução dos custos fixos.

O uso mais eficiente dos aeroportos mais bem localizados (seção 5.3.4), movendo-se a programação probabilística para aeroportos mais distantes, permite o uso mais eficiente da frota contratada e a realização de uma maior quantidade de voos na base mais econômica. Isso gera uma redução dos custos variáveis. Não

obstante as propostas para as bases mais bem localizadas, o uso racional dos aeroportos mais distantes, ao alocar *slots* livres de programação para o final do dia, conforme seção 5.3.5, possibilita que sejam mantidas inalteradas as capacidades de recuperação por um período maior do dia, conforme ilustrado na Figura 26. Por fim, a adoção de um olhar probabilístico com relação ao cumprimento das missões faz com que a solução de priorização de horários em função da previsibilidade de posição das unidades marítimas, descrita na seção 5.3.6, torna a tabela de voos menos susceptível às operações de unidades marítimas, o que facilita as programações aéreas de modo a manter alto nível de eficiência no uso dos helicópteros nos primeiros giros do dia. Uma conclusão interessante é que esta seção possui relação direta com a seção 5.3.5, que sugere o planejamento de *slots* livres para o final do dia. Ainda sobre a questão da visão probabilística, a adoção de tempos de *slots* livres em função da probabilidade de atendimento pode fazer surgir um *slot* livre onde anteriormente não caberia *slot* de tamanho máximo.

Enfim, todas as soluções apresentadas neste trabalho, oriundas da utilização do problema das múltiplas mochilas para o planejamento das tabelas de voo são úteis para a redução dos custos da operação aérea, pois buscam o máximo aproveitamento das aeronaves contratadas, respeitando as limitações impostas por regulamentação e necessidades operacionais, além de gerar aumento da capacidade de recuperação de voos, atendendo o objetivo principal deste trabalho.

No aspecto operacional, é importante ressaltar que as soluções obtidas precisaram ser negociadas com os clientes internos, além de ter sido necessárias algumas adequações nos voos de outros aeroportos, em função do incremento da oferta de voos no Heliporto de Farol de São Tomé. A partir deste trabalho, outras frentes de otimização foram iniciadas para melhorar o fluxo de passageiros e bagagens nesta base aérea, permitindo sucessivos incrementos de produtividade com a redução dos gargalos operacionais.

Apesar de o problema da mochila ser largamente estudado e haver várias publicações sobre as mais variadas aplicações práticas, é escasso o material publicado sobre a utilização deste tipo de solução nas programações de operações de transporte aéreo offshore. Por isso, dados os volumes financeiros envolvidos a partir deste tipo de otimização neste importante segmento da indústria de Óleo e Gás, sugere-se que sejam feitos novos estudos de refinamento desta modelagem. Desta forma, para a realização de trabalhos futuros, sugere-se que o modelo seja

revisado para atender às restrições de decolagens simultâneas e o espaçamento entre decolagens sucessivas, de forma que seja evitado este trabalho pelos analistas. Uma outra sugestão de estudo é a programação da tabela considerando uma visão de otimização estocástica, considerando os tempos de voo não de forma determinística, como foi feito neste trabalho, mas de forma probabilística, como foi feito de maneira simplificada e generalizada na seção 5.3.7. Tal otimização permitiria a geração de tabelas de voo com alto nível de cumprimento de programação, além de um planejamento de *slots* livres inteligente de forma a maximizar a capacidade de recuperação de voos.

7

Referências bibliográficas

ABBASI-POOYA, A.; KASHAN, A. H.. **New mathematical models and a hybrid Grouping Evolution Strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery.** Computers & Industrial Engineering, 112: 35-56. 2017.

AMARANTE, S. R. M. **Utilizando o problema de múltiplas mochilas para modelar o problema de alocação de máquinas virtuais em Computação nas Nuvens.** 2013.

BALASHOV, V.; ANTIPINA, E. **Distribution of Workload in IMA Systems by Solving a Modified Multiple Knapsack Problem.** EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization, 1166–1177. doi:10.1007/978-3-319-97773-7_101, 2018.

BARTHOLDI, J. J. **The Knapsack problem in Building Intuition.** Boston, MA, USA: Springer, 2008, pp. 19-31. 2008.

BEDNARCZUK, E. M. et al. **A multi-criteria approach to approximate solution of multiple-choice knapsack problem.** 2018.

CAPRARA, A.; KELLERER, H.; PFERSCHY, U. **The Multiple Subset Sum Problem.** SIAM J. OPTIM. 2000 Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 11, No. 2, pp. 308–319. 2000.

ROSA, R. A.; MACHADO, A. M.; RIBEIRO, G. M.; MAURI, G. R. **A mathematical model and a Clustering Search metaheuristic for planning the helicopter transportation of employees to the production platforms of oil and gas.** Computers & Industrial Engineering, 101: 303-312. 2016.

EZUGWU, A. E. et al. **Comparative Study of Meta-Heuristic Optimization Algorithms for 0-1 Knapsack Problem: Some Initial Results.** IEEE, Volume 7, 2019.

FIALA, M. T.; PULLEYBLANK, W. R. **Precedence constrained routing and helicopter scheduling: heuristic design.** INFORMS Journal on Applied Analytics. 1992.

FORREST, J.; RALPHS, T.; VIGERSKE, S.; Louhafer, KRISTJANSSON, B.; SALTZMAN, M. Coin-or/Cbc: Version 2.9.9 (Version releases/2.9.9). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.1317566>, 2018.

GALVÃO, R. D.; GUIMARÃES, J. **The control of helicopter operations in the Brazilian oil industry: Issues in the design and implementation of a computerized system.** European Journal of Operational Research, v. 49, n. 2, p. 266-270. 1990.

GUERET, C.; PRINS, C. **A new lower bound for the open-shop problem.** Annals of Operations Research, 92:165-183, 1999.

HERINGER, F. M. **Aplicação de uma heurística ao problema de múltiplas mochilas de tamanhos variados para a redução de custos no transporte aéreo offshore.** ANPET, 2019.

HRISTAKEVA, M.; SHRESTHA, D. **Different approaches to solve the 0/1 Knapsack problem.** in Proc. Midwest Instruct. Comput. Symp., Apr. 2005.

ICA 100-4. **Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica: Regras e Procedimentos Especiais de Tráfego Aéreo para Helicópteros.** Instruções do Comando da Aeronáutica. 2018.

KELLERER H.; PFERSCHY U.; PISINGER D. **The Multiple-Choice Knapsack Problem.** In: Knapsack Problems. Springer, Berlin, Heidelberg. 2004.

KOLESAR, P. J. **A branch and bound algorithm for the Knapsack problem.** Manage. Sci., vol. 13, no. 9, pp. 723-735. 1967.

LOUGEE-HEIMER, R. **The Common Optimization INterface for Operations Research,** IBM Journal of Research and Development, v47(1):57-66, CP-AI-OR 2001. 2003.

MANASEER, S.; ALMOGDADY, H. **New hybrid approach to solve the 0/1 Bounded Knapsack.** Vol. 3, p. 125. 2017.

MARTELLO, S.; Toth, P. **Knapsack problems: algorithms and computer implementations.** ISBN 0-471-92420-2. 1990.

MARTELLO, S.; PISINGER, D.; TOTH, P. **Dynamic programming and strong bounds for the 0-1 Knapsack problem.** Manage. Sci., vol. 45, no. 3, pp. 414-424. 1999.

MARTELLO, S.; PISINGER, D.; TOTH, P. **New trends in exact algorithms for the 0-1 Knapsack problem.** Eur. J. Oper. Res., vol. 123, no. 2, pp. 325-332, 2000.

MASON, A.J. **“OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes in Excel”**, Operations Research Proceedings 2011, eds. Klatte, Diethard, Lüthi, Hans-Jakob, Schmedders, Karl, Springer Berlin Heidelberg, pp 401-406, 2012, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29210-1_64, <http://opensolver.org>. 2011.

MENDES, G. V.; LOPES, L. A. S.; SILVA, O.S. **Proposta de otimização do transporte de passageiros por helicópteros em operações offshore da Petrobras.** Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n.6, p.33904-33920, ISSN 2525-8761, 2020.

MENEZES F.; PORTO O.; REIS M. L.; MORENO L.; ARAGÃO M. P.; UCHOA E.; ABELEDO H.; NASCIMENTO N. C. **Optimizing Helicopter**

Transport of Oil Rig Crews at Petrobras. Interfaces, v. 40, n. 5, p. 408-416, 2010.

MORENO L., DE ARAGÃO M.P., UCHOA E. **Column Generation Based Heuristic for a Helicopter Routing Problem.** In: Álvarez C., Serna M. (eds) Experimental Algorithms. WEA 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 4007. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11764298_20, 2006.

MTB. **Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho NR-37.** Disponível em: <http://www.trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/nr-37-atualizada-2018.pdf>. Acesso em 17 de abril de 2020.

NOWAK, P.; NOWAK, M. **Branch and bound algorithm - Software proposal for schedules optimization.** 2010.

PEREIRA, H. L: **Otimização da Logística de Transporte de Passageiros Offshore por Helicópteros na Bacia de Santos.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

QIAN, F.; GRIBKOVSKAIA, I; HALSKAU S. Ø. **Helicopter routing in the Norwegian oil industry: Including safety concerns for passenger transport.** International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 41.4: 401-415. 2011.

QIAN, Fubin, et al. **Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation.** Omega, 40.5: 584-593. 103. 2012.

QIAN, Fubin, et al. **Minimization of passenger takeoff and landing risk in offshore helicopter transportation: Models, approaches and analysis.** Omega, 51: 93-106. 2015.

RENIERS, G. L.; SÖRENSEN, K. **An approach for optimal allocation of safety resources: Using the Knapsack problem to take aggregated cost-efficient preventive measures.** Risk Anal., vol. 33, no. 11, pp. 2056-2067, 2013.

SENA, N. S: **Planejamento de rede logística de transporte aéreo de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo em bacia marítima utilizando programação inteira mista.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

SHAHEEN, A.; SLEIT, A. **Comparing between different approaches to solve the 0/1 Knapsack problem.** Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur., vol. 16, no. 7, p. 1. 2016.

STURGES, H. A. **The Choice of a Class Interval.** Journal of the American Statistical Association, 21:153, 65-66, DOI:10.1080/01621459.1926.10502161. 1926.

TARI, F. **Exact Solution Algorithms for Multi-Dimensional Multiple-Choice Knapsack Problems.** West Bengal, India: Current Journal of Applied Science and Technology. doi: 10.9734/CJAST/2018/40420. 2018.