

PLANEJAMENTO DE REDE LOGÍSTICA DE TRANSPORTE AÉREO DE
PESSOAS PARA ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO EM BACIA MARÍTIMA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO INTEIRA
MISTA

Nathália da Silva Sena

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira
Filho
Laura Silvia Bahiense da Silva
Leite

Rio de Janeiro
Julho de 2011

PLANEJAMENTO DE REDE LOGÍSTICA DE TRANSPORTE AÉREO DE
PESSOAS PARA ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO EM BACIA MARÍTIMA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO INTEIRA
MISTA

Nathália da Silva Sena

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof^a. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Nelio Domingues Pizzolato, Ph.D.

Prof. Luiz Satoru Ochi, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2011

Sena, Nathália da Silva

Planejamento de rede logística de transporte aéreo de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo em bacia marítima utilizando programação inteira mista/ Nathália da Silva Sena. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XV, 125 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2011.

Referencias Bibliográficas: p.74-77.

1. Modelos de Localização. 2. Pesquisa Operacional. 3. Planejamento de Rede Logística. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

DEDICATÓRIA

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.” (Isaac Newton)

Dedico aos meus pais João e Sylvia pela educação e apoio e a meu marido Thyago pela paciência, incentivo e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me criou, deu saúde e forças para correr atrás de meus sonhos.

A meus pais que me ensinaram o valor da educação, me apoiaram e incentivaram sempre.

Ao Thyago, meu marido, que foi companheiro, paciente e não me deixou desanimar.

Aos orientadores Virgílio e Laura pelo direcionamento do trabalho.

À Petrobras pela disponibilização das informações e pela minha liberação para a finalização do mestrado.

Aos demais familiares e amigos pelo apoio e torcida!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PLANEJAMENTO DE REDE LOGÍSTICA DE TRANSPORTE AÉREO DE
PESSOAS PARA ATIVIDADES DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE
PETRÓLEO EM BACIA MARÍTIMA UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO INTEIRA
MISTA

Nathália da Silva Sena

Julho/2011

Orientador(es): Virgílio José Martins Ferreira Filho

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Produção

As descobertas de petróleo dos últimos anos, principalmente na camada do pré-sal da Bacia de Santos, apontam para um grande crescimento da exploração e produção de petróleo no Brasil. Conseqüentemente, haverá aumento da demanda por movimentação de passageiros para as sondas de perfuração e plataformas de produção. Este transporte se tornará também mais complexo devido ao aumento da distância média entre os campos e a costa brasileira.

O helicóptero é o modal mais utilizado para este fim. Este é o meio de transporte de maior eficiência devido à rapidez e segurança, porém apresenta custos elevados. Logo, a otimização da rede logística de transporte de passageiros para trabalho em atividade offshore torna-se um tema economicamente relevante.

O objetivo desta dissertação é o aprimoramento do modelo de otimização utilizado atualmente para planejamento de rede logística de passageiros da Petrobras. Este modelo provê aos gestores informações mais precisas para auxiliá-los nas tomadas de decisão com relação ao planejamento da infraestrutura logística. Decisões estas que envolvem dispêndios consideráveis e que uma vez tomadas não são facilmente alteradas.

O modelo aperfeiçoado proposto apresenta menor nível de incertezas nos resultados gerados de localização de aeródromos, distribuição da demanda e frota. Os cenários rodados no estudo de caso apresentaram tempo de processamento aceitável, mesmo tendo um aumento considerável de complexidade. As revisões no modelo possibilitaram utilizá-lo também para a definição do perfil ótimo de frota, gerando oportunidades de redução de custos para a empresa.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LOGISTIC NETWORK PLANNING FOR PEOPLE AIR TRANSPORT TO WORK
IN PETROLEUM PRODUCTION AND EXPLOTATION USING MIXED INTEGER
PROGRAMMING

Nathália da Silva Sena

July/2011

Advisors: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Industrial Engineering

The oil discoveries of recent years, especially in the pre-salt Santos Basin, show a large increase in petroleum exploration and production in Brazil. Thus, crew transport demand for drilling rigs and production platforms will increase. This transport will also become more complex due to increased average distance between the fields and the Brazilian coast.

The helicopter is the most used modal for this purpose. This is the mean of transportation with the highest efficiency due to speed and safety, but it has high costs. Therefore, optimization of crew transport logistic network becomes an economically relevant issue.

The objective of this thesis is to improve the optimization model currently used in Petrobras for planning of the crew transport logistics network. This model provides more accurate information to managers to assist the decision making regarding the planning of the logistics infrastructure. Such decisions involve considerable expenditures, and once made are not easily changed.

The proposed model shows lower level of uncertainty in the outputs of location of airfields, demand allocation and profile of the fleet. The scenarios generated in the case study presented acceptable processing time, despite a considerable increase in complexity. The revisions in the model allowed its use to define the optimal profile of the fleet creating cost saving opportunities for the company.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. SISTEMA LOGÍSTICO DE TRANSPORTE DE PESSOAL PARA TRABALHO OFFSHORE	5
2.1 HISTÓRICO E SITUAÇÃO ATUAL DA CADEIA	5
2.2 COMPONENTES DO SISTEMA LOGÍSTICO	9
2.2.1 Bases Terrestres	9
2.2.2 Aeródromos	9
2.2.3 Unidades Marítimas (UM)	10
2.2.4 Helicópteros	11
2.2.5 Demanda	12
2.3 REGULAMENTAÇÃO APLICADA ÀS OPERAÇÕES NO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO	14
2.4 PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS	16
2.4.1 Operacional	17
2.4.2 Tático	19
2.4.3 Estratégico	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO	22
3.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA	23
3.3 O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO	24
3.3.1 Histórico	24
3.3.2 Classificação dos problemas de localização	25
3.3.3 Métodos de Resolução dos Problemas de Localização	28
4. PROBLEMA BÁSICO DE LOCALIZAÇÃO DE AERÓDROMOS	31
4.1 MODELAGEM CONCEITUAL	31
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	33

4.3	O SOFTWARE UTILIZADO	39
4.4	ENTRADA E SAÍDA DE DADOS.....	39
4.5	LIMITAÇÕES DO MODELO	40
5.	MODELO APERFEIÇOADO DE LOCALIZAÇÃO DE AERÓDROMOS ..	42
5.1	REVISÃO DO CÁLCULO DE DISTÂNCIAS AERÓDROMO-UM PARA BACIA DE CAMPOS	42
5.2	TRANSFORMAR VARIÁVEL CONTÍNUA K EM INTEIRA	43
5.3	RESTRICÇÃO DE VAGAS	44
5.4	RESTRICÇÕES DE HELIPONTOS DE ALGUMAS UNIDADES MARÍTIMAS.....	44
5.5	INCLUSÃO DOS INVESTIMENTOS EM CONSTRUÇÃO E ADEQUAÇÃO DE AERÓDROMOS E DE SEUS CUSTOS OPERACIONAIS.....	46
5.6	INCLUSÃO DO CÁLCULO DE OCUPAÇÃO MÁXIMA DA AERONAVE DE ACORDO COM A DISTÂNCIA, RESPEITANDO SUA AUTONOMIA	47
6.	ESTUDO DE CASO.....	51
6.1	CASO LOGÍSTICO.....	51
6.1.1	Demanda.....	52
6.1.2	Aeródromos.....	54
6.1.3	Helicópteros.....	55
6.2	AMBIENTE COMPUTACIONAL	58
6.3	CENÁRIOS	59
6.3.1	Cenário livre e sem custos.....	60
6.3.2	Capacitado e sem custos.....	61
6.3.3	Livre e com custos;	61
6.3.4	Capacitado e com custos;	62
6.3.5	Capacitado, com custos e com demanda aumentada em 25%	62
6.3.6	Capacitado, com custos e com demanda reduzida em 25%	62
6.4	RESULTADOS	63
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	ANEXO I – RESULTADOS COMPLETOS	78
	ANEXO II – PROGRAMA FONTE.....	115

ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Crescimento das reservas provadas de petróleo brasileiras (Fonte: Adaptado de ANP, 2009)	1
Figura 2: Aumento das distâncias à costa e dispersão das unidades marítimas da Petrobras na Bacia de Santos em relação à Bacia de Campos e Espírito Santo (Fonte: Mapa desenvolvido a partir de dados disponibilizados pela Petrobras).....	2
Figura 3: Sikorsky S61N - Primeiro helicóptero utilizado para transporte aéreo de passageiros para plataformas marítimas da Petrobras, na Bacia de Campos. (LAUX, 2010)	6
Figura 4: Sistemas de Transbordo de Passageiros de Embarcação para Unidade Marítima (Adaptado de STRONG, 2008 e LOCKHEED MARTIN, 2008).....	7
Figura 5: Distribuição Geográfica dos Aeroportos a Serviço da Petrobras no SSE (Fonte: Mapa desenvolvido a partir de dados disponibilizados pela Petrobras).....	8
Figura 6: Distribuição de passageiros por aeroporto, no SSE em 2010 (Fonte: Dados disponibilizados pela Petrobras).....	8
Figura 7: Elos do Sistema Logístico de Transporte de Passageiros para atividade de exploração e produção de petróleo e gás natural <i>offshore</i> da Petrobras	9
Figura 8: Exemplos de unidades marítimas de produção de petróleo (Fonte: Banco de Imagens Petrobras)	11
Figura 9: Nova carta aeronáutica da Área de Controle Terminal (TMA) Macaé. (Fonte: AIS/DECEA, 2009).....	16
Figura 10: Três pilares para a definição da capacidade aeronáutica (Fonte: Adaptado de HORONJEFF e MCKELVEY, 1993).....	21
Figura 11: Distribuição dos custos logísticos para empresas brasileiras (Fonte: ILOS, 2010) ...	23
Figura 12: Variação mensal da movimentação de passageiros da Petrobras no Sul-Sudeste em 2009 (Fonte: SENA e FERREIRA FILHO, 2010).....	33
Figura 13: Metodologia de Planejamento de Rede Logística (Adaptado de SENA <i>et. al.</i> 2010) 51	
Figura 14: Metas de produção de óleo e gás natural 2010-2020 (GABRIELLI e BARBASSA, 2011)	53
Figura 15: Estimativa de demanda de passageiros utilizada no estudo de caso. (Fonte: Valores arbitrados para teste do modelo não representando a demanda real)	54
Figura 16: Mapa ilustrativo dos aeródromos em operação e dos pontos considerados como potenciais para novas bases aeroportuárias no estudo de caso.....	55
Figura 17: Aeronave AW 139 da empresa AgustaWestland.....	56
Figura 18: Aeronave EC225 da empresa Eurocopter	56
Figura 19: Taxas de desempenho do solver GUROBI versus CPLEX na resolução de MIPs de acordo com estudo de benchmark de solvers (Adaptado de MITTELMANN, 2011)	59
Figura 20: Evolução do número médio de passageiros por aeronave até 2020 para a rodada b do cenário 4.	67
Figura 21: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4B	67
Figura 22: Distribuição dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4B	68
Figura 23: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4B.....	69
Figura 24: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1A.....	78
Figura 25: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1A	79
Figura 26: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1A	79

Figura 27: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1B	80
Figura 28: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1B	80
Figura 29: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1B.....	81
Figura 30: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1C	81
Figura 31: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1C	82
Figura 32: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1C.....	82
Figura 33: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1D	83
Figura 34: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1D	83
Figura 35: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1D	84
Figura 36: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2A.....	84
Figura 37: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2A.....	85
Figura 38: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2A	85
Figura 39: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2B	86
Figura 40: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2B	86
Figura 41: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2B.....	87
Figura 42: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2C	87
Figura 43: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2C	88
Figura 44: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2C.....	88
Figura 45: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2D.....	89
Figura 46: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2D.....	89
Figura 47: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2D	90
Figura 48: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3A.....	90
Figura 49: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3A	91
Figura 50: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3A	91
Figura 51: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3B	92
Figura 52: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3B	92
Figura 53: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3B.....	93
Figura 54: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3C	93
Figura 55: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3C	94
Figura 56: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3C.....	94
Figura 57: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3D.....	95
Figura 58: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3D	95
Figura 59: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3D	96
Figura 60: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4A.....	96
Figura 61: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4A	97
Figura 62: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4A	97

Figura 63: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4B	98
Figura 64: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4B	98
Figura 65: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4B.....	99
Figura 66: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4C	99
Figura 67: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4C	100
Figura 68: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4C.....	100
Figura 69: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4D	101
Figura 70: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4D	101
Figura 71: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4D	102
Figura 72: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5A.....	102
Figura 73: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5A.....	103
Figura 74: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5A	103
Figura 75: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5B	104
Figura 76: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5B	104
Figura 77: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5B.....	105
Figura 78: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5C	105
Figura 79: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5C	106
Figura 80: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5C.....	106
Figura 81: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5D.....	107
Figura 82: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5D.....	107
Figura 83: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5D	108
Figura 84: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6A.....	108
Figura 85: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6A	109
Figura 86: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6A	109
Figura 87: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6B	110
Figura 88: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6B	110
Figura 89: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6B.....	111
Figura 90: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6C	111
Figura 91: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6C	112
Figura 92: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6C.....	112
Figura 93: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6D.....	113
Figura 94: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6D	113
Figura 95: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6D	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Níveis de planejamento da logística de transporte de passageiros e estudos publicados sobre as atividades.....	17
Tabela 2: Taxonomia proposta por DASKIN (1995) <i>apud</i> TAFAZZOLI e MOZAFARI (2009)	26
Tabela 3: Parâmetros considerados para as aeronaves AW 139 e EC 225.....	57
Tabela 4: Dimensões dos cenários rodados.....	60
Tabela 5: Resumo dos Resultados Computacionais.....	63
Tabela 6: Comparativo de rodadas com e sem penalização da função objetivo.	64
Tabela 7: Comparativo de custos médios dos grupos de cenários em relação ao cenário 1.....	65
Tabela 8: Análise de sensibilidade de custos dos cenários a variações na demanda.....	65

LISTA DE SIGLAS

III COMAR – 3º Comando Aéreo Regional da Aeronáutica (RJ)

AIMMS – Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil;

CEL – Centro de Estudos em Logística

CFLP – *Capacited Facility Location Problem*

COPPEAD – Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DAESP – Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo

DECEA – Departamento de Controle de Espaço Aéreo

DP – *Dinamic Positioning*

FPSO – Floating, Production, Storage and Offloading

FSO – Floating, Storage and Offloading

ICA – Instrução Civil Aeronáutica

ICAO – International Civil Aviation Organization

IFR – *Instrument Flight Rules*

ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain;

NORMAN – Norma da Autoridade Marítima

PBO – Peso Básico Operacional

PMD – Peso Máximo de Decolagem

POB – *People on Board*

QAV – Querosene de Aviação

SAD – Sistema de Apoio a Decisão

SSE – Sul-Sudeste

TMA – Área de Controle Terminal

UFLP – *Uncapacited Facility Location Problem*

UM – Unidade Marítima

US-LOG – Unidade de Serviços de logística da Exploração e Produção da Petrobras

VFR – *Visual Flight Rules*

MIP – *Mixed Integer Programming*

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o problema estudado nesta dissertação, os objetivos e contribuições do trabalho e, por fim, a estrutura desta dissertação.

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

A definição da rede logística de atendimento às unidades marítimas de exploração e produção de petróleo, que contempla escolha da localização dos aeródromos, alocação da demanda a estes aeródromos e determinação do perfil da frota, torna-se cada dia mais impactante no custo logístico total, e conseqüentemente no custo de extração do óleo. Algumas causas são:

- Crescimento acelerado das reservas de petróleo brasileiras (
- Figura 1);
- Aumento das distâncias dos campos petrolíferos em relação à costa; e,
- Aumento da dispersão das unidades marítimas (distância relativa entre estas unidades) (Figura 2).

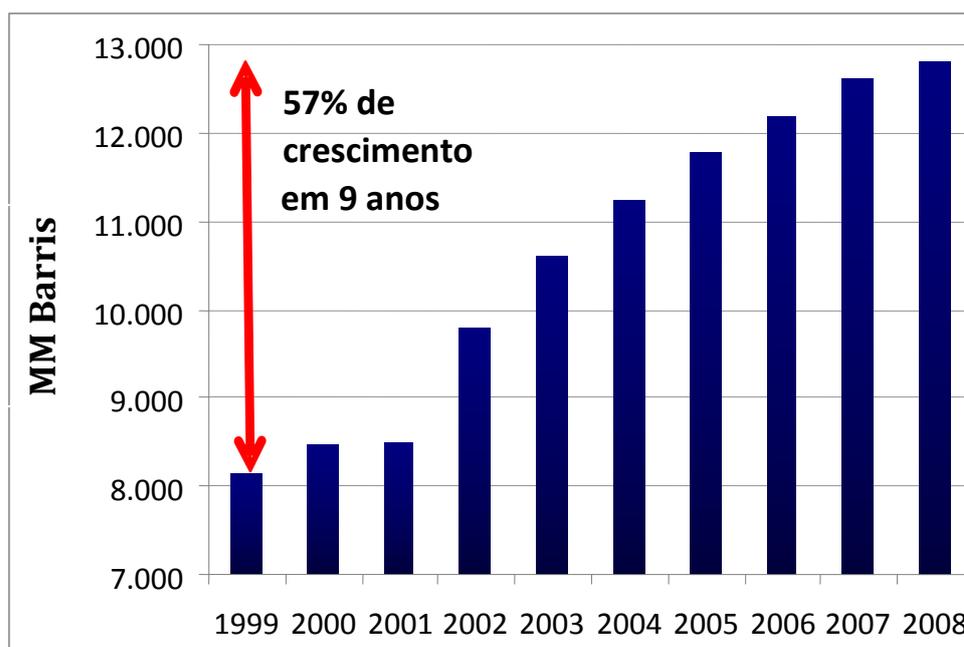


Figura 1: Crescimento das reservas provadas de petróleo brasileiras (Fonte: Adaptado de ANP, 2009)

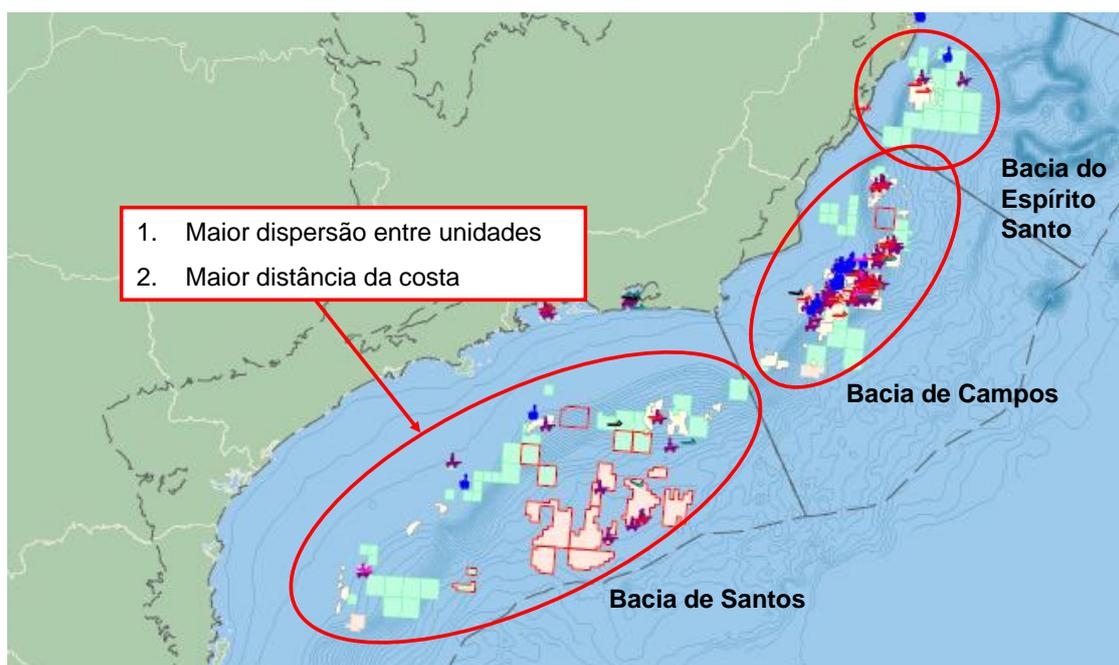


Figura 2: Aumento das distâncias à costa e dispersão das unidades marítimas da Petrobras na Bacia de Santos em relação à Bacia de Campos e Espírito Santo (Fonte: Mapa desenvolvido a partir de dados disponibilizados pela Petrobras)

O aumento de distâncias tanto em relação à costa como entre as unidades marítimas dificulta a formação de rotas de atendimento já que a autonomia da aeronave precisa ser respeitada e sua capacidade disponível para passageiros reduz com o aumento do peso de combustível carregado. Adicionalmente, as distâncias influenciam em uma maior necessidade de bases aéreas espalhadas ao longo da costa.

Neste contexto, os custos logísticos tendem a causar um maior impacto no custo de extração de óleo. Portanto, é de grande importância a construção de uma rede logística otimizada para que não se inviabilize a produção nos campos mais distantes da costa.

Entretanto, os desafios não estão relacionados apenas aos custos, mas também em relação à autonomia de vô das aeronaves e a segurança de vô, sendo de grande relevância a utilização de modelos de pesquisa operacional para auxiliar no planejamento de rede logística e planejamento de frota nos períodos de médio e longo prazo.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como motivação o desenvolvimento de um modelo de planejamento de rede logística de transporte de passageiros para a Petrobras. Este modelo deve ser eficaz no suporte às decisões de longo prazo relativas as configurações logísticas da infraestrutura aeroportuária, e do perfil da frota para o transporte de passageiros para trabalho em bacias petrolíferas marítimas, nas atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural.

Este trabalho tem como base um modelo de programação inteira mista, desenvolvido pelo Centro de Estudos em Logística (CEL) do Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa em Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPEAD) e, adaptado internamente pela Petrobras pela área de Serviços de Pesquisa Operacional, juntamente com a Unidade de Serviços de Logística da Exploração e Produção (US-LOG), área usuária (SENA *et. al.*, 2010). Tal modelo é utilizado atualmente para estudos de localização e dimensionamento de capacidade de aeródromos, auxílio nas projeções de longo prazo de frota e estudos de perfil de frota de helicópteros. Entretanto, foram identificadas algumas limitações e simplificações que geram incertezas ao resultado, podendo estimular decisões equivocadas que elevem os custos operacionais da empresa.

Portanto, o objetivo final é aperfeiçoar o modelo, representando através de novas restrições e variáveis, reformulações e alterações no pré-processamento dos dados algumas características operacionais não contempladas no modelo básico, sem que o aumento no tempo computacional torne sua utilização inviável.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O modelo aperfeiçoado nesta dissertação possibilita que os gestores da Petrobras possam tomar decisões relativas à localização de aeródromos e alocação das demandas

de passageiros às bases aéreas com maior embasamento, em função da maior precisão e qualidade dos resultados fornecidos.

Adicionalmente, o modelo indica a composição de frota de aeronaves de menor custo para diferentes cenários de demanda e custos de frota, sendo de grande importância para o planejamento logístico da companhia.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para cumprir o propósito estabelecido, esta dissertação está organizada como apresentado a seguir: no Capítulo 2 se descreve o sistema logístico de transporte de passageiros para trabalho *offshore*, no qual o problema de estudo desta dissertação esta inserido; a revisão da bibliografia disponível sobre o tema é realizada no Capítulo 3; o modelo atualmente utilizado, o qual é objetivo de aprimoramento desta dissertação, é detalhado no Capítulo 4; o Capítulo 5 descreve as alterações no algoritmo do modelo de modo torná-lo mais robusto; no Capítulo 6 apresenta-se um estudo de caso utilizando o modelo desenvolvido; as conclusões e as recomendações para estudos futuros são apresentadas no Capítulo 7, seguidas pela referências bibliográficas (Capítulo 8) e anexos.

2. SISTEMA LOGÍSTICO DE TRANSPORTE DE PESSOAL PARA TRABALHO OFFSHORE

Neste capítulo descreve-se o sistema logístico de transporte de pessoal para trabalho em bacias petrolíferas marítimas. Na seção 2.1 apresenta-se um histórico e a configuração atual da cadeia. Cada componente da cadeia logística é detalhado na seção 2.2. A seguir, seção 2.3, descreve-se a regulamentação a qual esta sujeita a operação com helicópteros. Na sequência, descrevem-se as etapas do planejamento desta rede logística (Seção 2.4) e por fim, na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado o problema alvo desta dissertação e sua relevância.

2.1 HISTÓRICO E SITUAÇÃO ATUAL DA CADEIA

O transporte de passageiros para trabalho em exploração e produção de petróleo *offshore*, ao longo da história foi realizado através dos modais aéreo (helicópteros) e marítimo (lanchas rápidas). O modal aéreo é predominante nesta atividade devido à rapidez, flexibilidade e conforto proporcionado ao passageiro (BRITTAN e DOUGLAS, 2009).

A Petrobras começou suas atividades de transporte de passageiros para trabalho *offshore* em meados dos anos de 1970, quando houve início da exploração da Bacia de Campos. Inicialmente, utilizava-se um mix dos modais aéreo e marítimo. Tal movimentação perdurou até meados dos anos de 1990, porém através de estudo internos verificou-se que o modal aéreo apresentava maior flexibilidade e melhor desempenho (tempo e custo) do que o modal marítimo (HERMETO, 2009).



Figura 3: Sikorsky S61N - Primeiro helicóptero utilizado para transporte aéreo de passageiros para plataformas marítimas da Petrobras, na Bacia de Campos. (LAUX, 2010)

Alguns estudos apontaram como sendo o transporte por lancha o mais seguro (SPOUGE *et. al.*; 1994). Entretanto, o modal marítimo, além de ser mais lento no trajeto, apresenta problemas no transbordo da embarcação para a plataforma, que usualmente é realizado por cestas içadas pelo guindaste da plataforma. Este sistema de transbordo apresenta limitações de operação de acordo com condição de mar e vento, tendo janela operacional menor que a do modal aéreo.

Atualmente, existem novas tecnologias de transporte dos passageiros para plataformas, com lanchas mais rápidas (chegando a 50 nós de velocidade) e de maior estabilidade. Os sistemas de transbordo também passaram por evoluções tecnológicas tornando-se mais seguros. Como exemplo, tem-se a cesta rígida, que apresenta maior segurança que a convencional, sendo utilizada desde 2008 no Oeste da África (BRITTAN, 2009). Alguns modelos de rampa (Figura 4), também estão em desenvolvimento e/ou fase de testes. Entretanto, esta dissertação será limitada ao estudo do transporte pelo modal aéreo, utilizado em 100% das movimentações de passageiros da Petrobras, na região Sul-Sudeste (SSE) nos últimos anos.

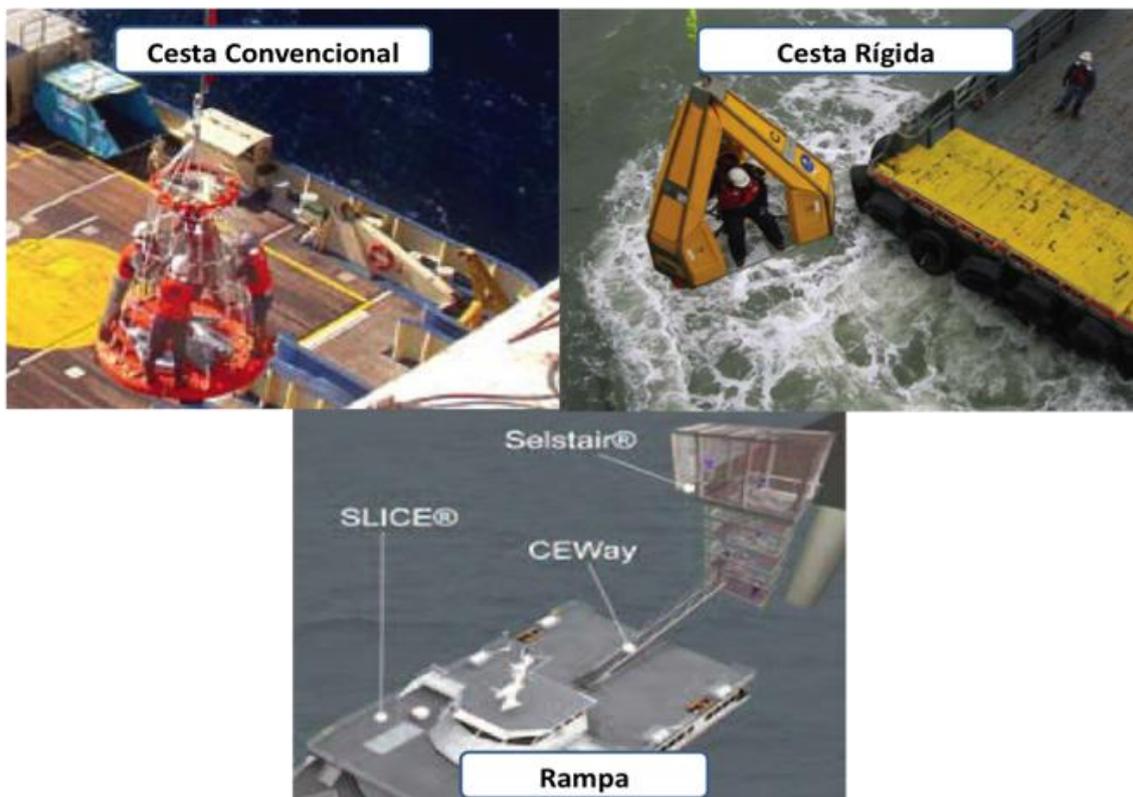


Figura 4: Sistemas de Transbordo de Passageiros de Embarcação para Unidade Marítima (Adaptado de STRONG, 2008 e LOCKHEED MARTIN, 2008)

A rede logística utilizada atualmente na operação de apoio *offshore* para o transporte aéreo de passageiros da Petrobras no SSE, escopo do estudo, é composta pelos aeroportos de Vitória, Macaé, Cabo Frio, Jacarepaguá, Itanhaém, Navegantes e o Heliporto de São Tomé, como pode ser visto no mapa da Figura 5. O heliporto de São Tomé pertence à Petrobras e possui uma localização privilegiada em relação às unidades da Bacia de Campos. O aeroporto de Cabo Frio é operado pela empresa Costa do Sol, o de Itanhaém é operado pelo Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo (DAESP). Os demais aeroportos são operados pela INFRAERO.

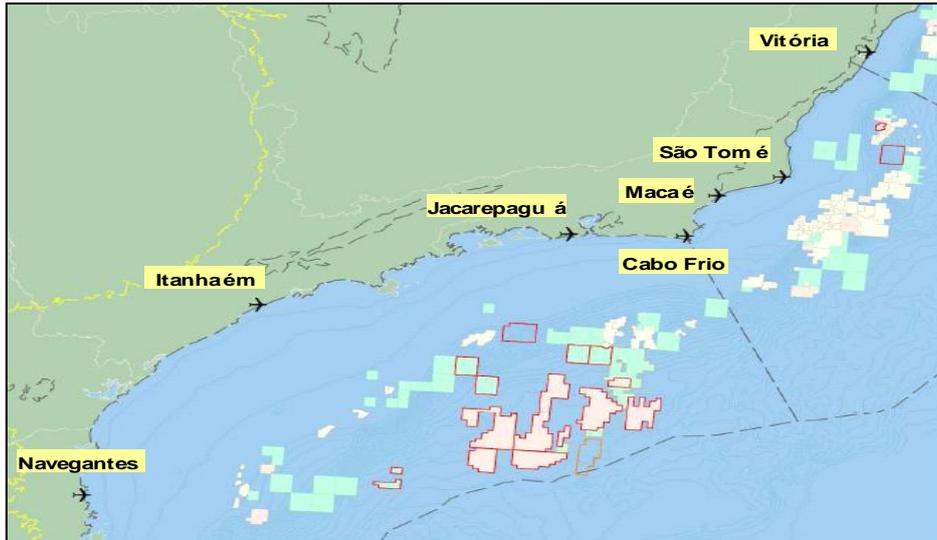


Figura 5: Distribuição Geográfica dos Aeroportos a Serviço da Petrobras no SSE (Fonte: Mapa desenvolvido a partir de dados disponibilizados pela Petrobras)

Na Figura 6, pode-se observar a distribuição da demanda entre as bases aeroportuárias realizada no ano de 2010. O aeroporto de Macaé foi o responsável por 45% de toda a movimentação de passageiros no SSE. Agrupando-o com o heliporto de São Tomé e o aeroporto internacional de Cabo Frio, que também fazem o transporte para a Bacia de Campos, chega-se a 77% da movimentação total. Isto comprova que a grande concentração atual de atividades se encontra na região de Campos do Pós-Sal Bacia de Campos.

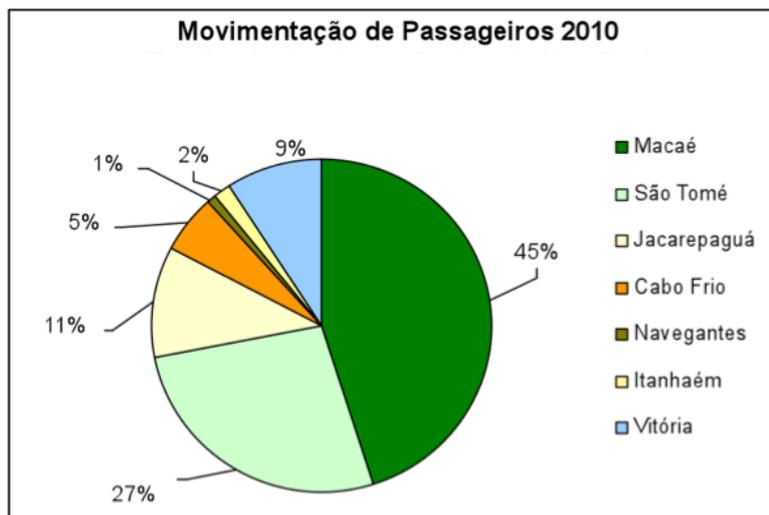


Figura 6: Distribuição de passageiros por aeroporto, no SSE em 2010 (Fonte: Dados disponibilizados pela Petrobras)

Entretanto, o crescimento previsto para os próximos anos está concentrado na província do Pré-Sal da Bacia de Santos, de maior extensão e distância da costa que as Bacias de Campos e Espírito Santo.

2.2 COMPONENTES DO SISTEMA LOGÍSTICO

O Sistema logístico de movimentação de passageiros para trabalho em exploração e produção de petróleo e gás natural em bacias marítimas é composto por três elos principais, que são as bases terrestres, aéreas e unidades marítimas. Entre estes elos, ocorre a movimentação da demanda de passageiros através dos modais terrestre e aéreo. O problema de planejamento de rede logística envolve direta ou indiretamente cada um destes componentes através das variáveis e restrições presentes em sua formulação.



Figura 7: Elos do Sistema Logístico de Transporte de Passageiros para atividade de exploração e produção de petróleo e gás natural *offshore* da Petrobras

2.2.1 Bases Terrestres

Cada funcionário está alocado a uma base terrestre da companhia e deve apresentar-se nesta base, sendo o transporte terrestre até a base aérea custeado pela empresa, por modal rodoviário. A partir da base aérea, os passageiros seguem viagem para as unidades marítimas de destino por meio de helicópteros.

Estes custos, entretanto, se mostram irrelevantes comparados ao custo do transporte aéreo.

2.2.2 Aeródromos

Segundo a ICAO (1999), aeródromos são áreas definidas em terra ou na água (incluindo quaisquer construções, instalações e equipamentos) com o propósito de serem utilizadas, no todo ou em parte, para a chegada, partida e movimentação de

aeronaves em sua superfície. Estes são denominados heliportos quando utilizados para a chegada, partida e movimentação de helicópteros.

Os heliportos utilizados para o transporte de passageiros offshore funcionam como centros de distribuição, sendo que sua localização influencia consideravelmente no dimensionamento de recursos e, como consequência, nos custos de extração de petróleo.

2.2.3 Unidades Marítimas (UM)

São as instalações *offshore* responsáveis pelas atividades de exploração e produção da empresa. Os principais tipos de UMs em utilização atualmente pela Petrobras são:

a) Fixa de Produção: possui superestrutura apoiada no solo marinho através de jaqueta (estrutura metálica fixa). É utilizada em lâminas d'água rasas (até 450 metros de profundidade, aproximadamente).

b) Flutuante de Produção: consiste em uma plataforma superior semi-submersível. A superestrutura, sempre acima da linha d'água, é ligada por colunas aos cascos submersos. É utilizada para produção de petróleo em campos de águas profundas. Em geral é posicionada na área através de ancoragem.

c) FPSO/FSO (*Floating, Production, Storage and Offloading/ Floating, Storage and Offloading*): Tem as mesmas características de operação e projeto das semi-submersíveis, exceto que seu casco não submerge. O posicionamento é mais crítico, por apresentar maior área atingida por ondas. Em geral é ancorado, podendo também ser equipado com sistema de posicionamento dinâmico¹.

d) Sonda Ancorada: unidade marítima utilizada para perfuração e completção de poços. Pode ser do tipo semi-submersível ou um navio. Fixada na localidade por ancoragem.

¹ O sistema de posicionamento dinâmico controla automaticamente a posição de uma embarcação por meio de propulsão ativa. O sistema recebe as informações de sensores, sistemas de referência, propulsores e painel de controle, processa essas informações e as usa para calcular a potência necessária para manter a posição do navio/plataforma e em que direção essa potência deve ser aplicada. O resultado desse cálculo é então convertido em sinais que são enviados aos respectivos propulsores.

e) Sonda DP (*Dynamic Positioning*): possui as mesmas características que a sonda ancorada, exceto pela fixação na locação do poço que é realizada através de sistema de posicionamento dinâmico.

f) Outros (Barcos Especiais, Unidades de Manutenção e Segurança, etc): demais tipos de unidades operando nas bacias petrolíferas marítimas que possuem heliponto e recebem passageiros por modal aéreo.



Figura 8: Exemplos de unidades marítimas de produção de petróleo (Fonte: Banco de Imagens Petrobras)

2.2.4 Helicópteros

Helicópteros são aeronaves dotadas de hélices horizontais, que as tornam capazes de se estabilizar no ar e se deslocar em qualquer sentido. Pode-se também denominá-los aeronaves de asa rotativa, enquanto aviões são denominados aeronaves de asa fixa.

Segundo ROCHA (2001), a maior diferença da aeronave de asa rotativa em relação à de asa fixa é sua capacidade de se mover independentemente nas três direções e seis sentidos e de girar, também de forma independente nos planos longitudinal, vertical transversal e horizontal. Estas características conferem ao helicóptero a

possibilidade de pouso e decolagem sem necessidade de pista, o que habilita este modal para o transporte de pessoas para trabalho em unidades de produção e exploração *offshore*.

A capacidade de transporte do helicóptero varia de acordo com o modelo considerado. Cada modelo apresenta um Peso Máximo de Decolagem (PMD), que é o peso máximo com o qual consegue realizar vôo. A capacidade de transporte para um determinado destino, chamada de carga paga, de forma simplificada, é a diferença entre o PMD e o Peso Básico Operacional (PBO). O PBO é o somatório dos pesos de combustível necessário para a viagem, tripulação, equipamentos e peso bruto da aeronave. A carga paga pode ser utilizada para o transporte de passageiros e bagagem. Dividindo-se esta pelo peso médio do passageiro com sua bagagem, chega-se à quantidade de passageiros possíveis de serem transportados para um determinado modelo de helicóptero, considerando pontos de origem e destino estabelecidos.

2.2.5 Demanda

Cada tipo de UM apresenta um perfil diferente de demanda de passageiros que está relacionado à sua capacidade máxima de pessoas a bordo (*People on Board* – POB), definida pela Marinha Brasileira.

As sondas, por exemplo, apresentam uma quantidade maior de passageiros eventuais que as plataformas de produção devido à maior necessidade de prestação de serviços especiais durante as fases de perfuração e completação de um poço, além de apresentarem maiores limitações de espaço e menores capacidades para acomodação de pessoas a bordo.

Os principais tipos de demanda por movimentação de passageiros são descritos a seguir:

a) Troca de Turma: O principal motivo de embarque de passageiros para plataformas e sondas é a troca de turma. Cada plataforma possui um POB (*People on Board*), que representa a quantidade de funcionários fixos desta unidade marítima, que trabalham em regime de embarque e utilizam os vôos de troca de turma. Os profissionais que trabalham em regime de embarque passam um período, em geral de 14 dias na plataforma e retornam passando período igual ou maior de folga a depender de

regimes contratuais². Estes profissionais trabalham em funções essenciais para o funcionamento da operação sendo que para que um funcionário entre de folga outro tem que embarcar. Portanto, os vôos de troca de turma, em geral saem com toda a lotação da aeronave e retornam com a mesma quantidade de passageiros, sendo o tipo de vôo que melhor utiliza a frota. Como a cada 14 dias toda a equipe de uma plataforma é trocada, é necessário disponibilizar semanalmente 50% do POB em vagas nos vôos. É importante ressaltar que se utiliza uma vaga para movimentação de até 2 passageiros, sendo um embarque e um desembarque.

b) Eventuais: Alguns profissionais embarcam esporadicamente para realização de atividades especiais, vistorias, manutenções etc. Estes funcionários não possuem uma escala fixa de vôos. Para que as unidades marítimas possam se programar para o embarque de passageiros eventuais, cada unidade tem disponíveis na semana um número fixo de vagas para este tipo de vôo que gira em torno de 15% de seu POB. Este tipo de embarque apresenta uma ocupação menor que os vôos de troca de turma, podendo visitar uma quantidade maior de unidades marítimas. Além disto, estes vôos não possuem o balanceamento garantido de passageiros para embarque e desembarque. Logo, não se aproveita toda a capacidade da frota.

c) Comitiva e Outros: Além dos vôos descritos acima, existem os de comitiva, realizados para visitas especiais e fiscalização das plataformas e os vôos de transbordo, de passageiros de uma UM para outra. Para estes tipos de vôo não há uma regra específica de quantidade de vagas a disponibilizar. Entretanto, é necessário dimensionar aeronaves para esta função.

O planejamento da rede logística considera como premissa que as UMs existentes manterão comportamentos históricos de demanda. Para as unidades novas é considerada projeção de demanda obtida a partir do tratamento estatístico das informações históricas e da segregação das unidades nos modelos definidos no início desta subseção.

² Funcionários concursados da Petrobras que trabalham nas plataformas em regime de embarque trabalham por 14 dias nas plataformas, com intervalo de 21 dias entre embarques. Funcionários de empresas contratadas, no geral fazem embarque de 14 dias com intervalos de 14 dias entre embarques.

2.3 REGULAMENTAÇÃO APLICADA ÀS OPERAÇÕES NO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

O transporte aéreo de passageiros, por não ser atividade fim da Petrobras, é terceirizado a empresas especializadas em aviação civil. Estas empresas, assim como outras empresas que operem no Espaço Aéreo Brasileiro, estão sujeitas as regras da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e ação fiscalizadora do Departamento de Controle de Espaço Aéreo (DECEA) e do Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea do 3º Comando Aéreo Regional da Aeronáutica (III COMAR).

Diversas características e regras operacionais estão associadas ao procedimento de controle de voo utilizado pelas aeronaves. Os tipos de procedimento existentes são:

- a) VFR (*Visual Flight Rules*) – Voo realizado seguindo regras de voo visual. Neste tipo de voo há maior suscetibilidade ao fator humano. Logo, a regulamentação exige maior espaçamento entre aeronaves e condições meteorológicas mais favoráveis para que se possa realizar pousos e decolagens.
- b) IFR (*Instrument Flight Rules*) – Voo realizado seguindo regras de voo por instrumento. Como a aeronave está geo-referenciada e sob visão do controlador de voo, as exigências de espaçamento são menores e pode-se operar em condições meteorológicas mais extremas.

Os voos para transporte de passageiros *offshore* da Petrobras seguem as regras “IFR não-precisão”³ para pouso e decolagem nas bases aéreas e regras VFR para operações nas plataformas. Como as unidades marítimas possuem estruturas compactas e há obstáculos muito próximos aos helipontos, o procedimento de pouso nas plataformas em IFR não é permitido. Portanto, como recomendado na ICA 100-12 (COMANDO DA AERONÁUTICA, 2009), operações nas unidades marítimas só poderão ser realizadas à luz do dia, o que restringe a janela diária de operação. Adicionalmente, por questões de segurança, uma aeronave só pode ser designada a um

³ Os procedimentos de voo IFR podem ser subdivididos em IFR Não-Precisão e IFR Precisão. Para voos seguindo procedimento IFR Não-Precisão, utiliza-se para orientação, equipamentos de auxílio a navegação de não precisão, como: NDB, VOR, Recalada e Radar de Terminal. Os voos com procedimento IFR precisão utilizam informações fornecidas por equipamentos de precisão como ILS, Radar de aproximação de precisão e MLS.

vôo se tiver autonomia para ir à unidade marítima, retornar à base e ainda ter reserva de combustível para 30 a 45 minutos, de acordo com sua capacidade de transporte.

Os vôos *offshore* também estão sujeitos ao gerenciamento do tráfego do DECEA. Estes vôos são, em geral, realizados de forma linear entre aeródromo e unidade marítima. Entretanto, o elevado número de operações aéreas na Bacia de Campos, caracterizada por uma grande concentração de plataformas separadas por distâncias relativamente pequenas, cerca de 3 km entre plataformas, exigem procedimentos de controle maior, para garantir a segurança nas operações de transporte de passageiros *offshore*. Portanto, no ano de 2009, a Petrobras, juntamente com o DECEA, elaborou um estudo com a finalidade de definir nova carta aeronáutica para a Bacia de Campos.

O resultado deste trabalho foi a criação de uma carta de vôo aeronáutica para a Área de Controle de Terminal (TMA) Macaé (Figura 9), com a definição de portais de entrada e saída das aeronaves para a Bacia de Campos, bem como gabaritos de altitude de vôo. Os procedimentos contidos nesta nova carta tornaram o fluxo mais contínuo e controlado, fornecendo mais subsídios para o trabalho dos controladores de vôo e tornando o processo mais seguro.

De forma simplificada, o procedimento efetuado pela aeronave consiste em:

- a) decolagem do aeródromo de origem, cruzando o portal de entrada correspondente à unidade marítima a ser visitada, com altitude de vôo predeterminada (ex: 2.000 pés/3.000 pés);
- b) deslocamento pelo corredor de vôo até encontrar-se próximo à unidade;
- c) efetuação do procedimento de aproximação e pouso na plataforma;
- d) realização do desembarque e embarque de passageiros;
- e) decolagem em direção ao corredor de saída correspondente à unidade marítima visitada;
- f) ao fim do corredor, deslocamento linear até o destino final, que será o mesmo aeródromo de partida.

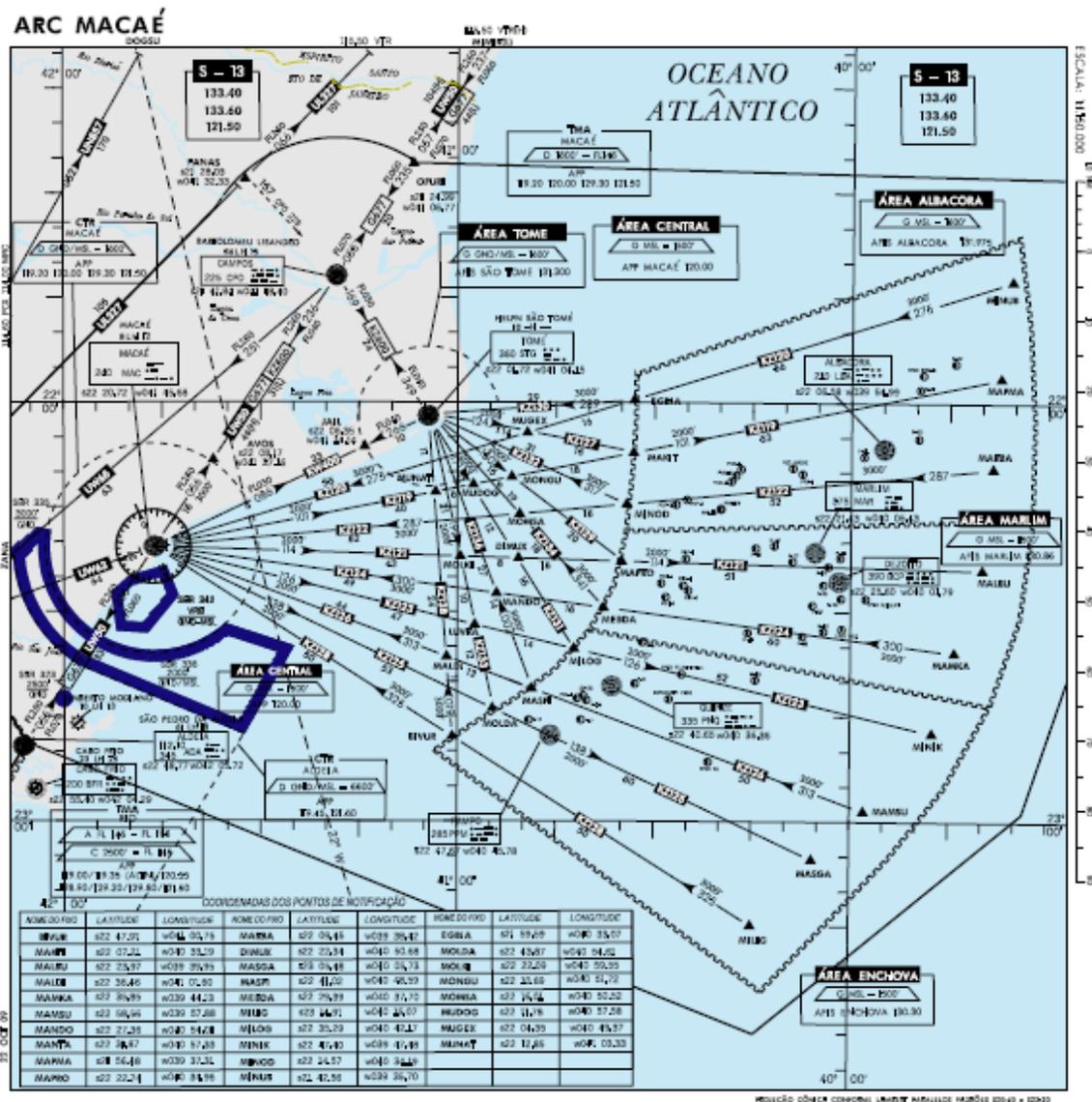


Figura 9: Nova carta aeronáutica da Área de Controle Terminal (TMA) Macaé. (Fonte: AIS/DECEA, 2009)

Estas alterações nas rotas tiveram impacto significativo nas distâncias percorridas pelas aeronaves, principalmente nos vôos partindo do Heliponto de São Tomé.

2.4 PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE DE PASSAGEIROS

O planejamento logístico do transporte de passageiros para trabalho offshore na Petrobras é composto por quatro macro-atividades, passando por três níveis de decisão,

conforme resumido na Tabela 1. Cada uma destas atividades será mais bem definida nas subseções a seguir.

Tabela 1: Níveis de planejamento da logística de transporte de passageiros e estudos publicados sobre as atividades

Nível de Planejamento	Atividade	Período de Análise	Atualização	Descrição	Bibliografia Disponível
Operacional	Roteirização	Dia	OnTime	Roteirização diária dos atendimentos seguindo os horários de voo pré-definidos por unidade marítima e as solicitações de atendimento do dia.	MENEZES ET AL (2010);ROMERO <i>et. al.</i> (2007); SIERKSMA E TIJSSSEN (1998); GALVÃO E GUIMARÃES (1990)
Tático	Definição de Tabela de Voo	Semana	Anual - Revisada quando há mudança de área de atendimento de uma sonda.	Definição de dias da semana e intervalos de horários e base aérea em que as unidades poderão solicitar atendimentos, além de um número de vagas disponibilizadas nestes horários.	SHERALI <i>et. al.</i> (2010);TAM <i>et. al.</i> (2011); YAN e TU (2002)
Tático	Dimensionamento de Frota	Bi-anual	Anual	Dimensionamento de Frota a ser contratada para os próximos a anos.	ROCHA (2001)
Estratégico	Planejamento de Rede	20 anos	Anual	Planejamento de longo prazo. Análise de Localização de Bases e Alocação de demanda às bases além de análise de perfil de frota.	SENA ET. AL.(2010); SENA E FERREIRA FILHO (2010)

2.4.1 Operacional

O nível de planejamento operacional contempla a roteirização diária das aeronaves, sujeita a revisões de acordo com questões de peso de passageiros, de fatores climáticos que influenciam no consumo de combustível (temperatura, direção de vento e pressão atmosférica na região), indisponibilidade climática, indisponibilidade de aeronaves e questões de sazonalidade de demanda. A decisão operacional já foi bastante estudada, tendo uma série de artigos publicados sobre o assunto.

No âmbito internacional pode-se destacar o estudo de SIERKSMA e TIJSSEN (1998), que utilizou programação linear e heurística na resolução do problema de roteirização para atendimento a 51 plataformas no Mar do Norte. Já ROMERO *et. al.* (2007) combinou heurísticas de otimização com algoritmo genético para a resolução do problema de roteirização de helicópteros para transporte *offshore*, aplicando o modelo a um caso real da *Mexican Oil Company* - PEMEX.

No contexto nacional, mais especificamente da Petrobras, destacam-se os estudos de GALVÃO E GUIMARÃES (1990) e MENEZES *et. al.* (2010). Os primeiros autores descrevem o desenvolvimento de um sistema computadorizado, baseado em um método heurístico, para roteirização do atendimento às unidades marítimas da Petrobras da Bacia de Campos. Este modelo, entretanto, não foi implantado devido a dificuldades de relacionamento entre analistas de pesquisa operacional e cliente, que surgiram principalmente na fase de implementação. No segundo artigo, descreve-se uma segunda tentativa, bem sucedida, de implementação de ferramenta de roteirização na Petrobras. MENEZES *et. al.* (2010) apontam uma economia anual de \$24 milhões, além de uma melhoria em segurança dos vôos com a implantação da ferramenta que teve sua formulação baseada em programação inteira mista, associada a um algoritmo de geração de colunas que associa heurística a métodos exatos.

A programação dos vôos, conforme descrito em MENEZES *et. al.* (2010), deve obedecer a uma série de restrições, descritas a seguir:

- a) Cada vôo começa e termina na mesma base aérea.
- b) Um helicóptero realiza no máximo 5 vôos em um dia.
- c) Um helicóptero precisa ser inspecionado após cada vôo, requerendo tempo de inspeção.
- d) O número de pousos em cada vôo é limitado.
- e) O número de pousos por passageiro também é limitado.
- f) Para cada intervalo de tempo, o número de helicópteros visitando uma mesma plataforma é limitado.
- g) Os helicópteros precisam parar para o almoço da tripulação.

- h) A capacidade dos helicópteros não pode ser excedida. Esta varia com o tipo de helicóptero, capacidade de tanques de combustível, e distância a ser percorrida na rota.
- i) A aeronave só pode voar do nascer ao pôr do sol, por questões de segurança.
- j) As restrições de dimensões e peso das aeronaves para pouso nos helipontos de cada UM devem ser respeitadas⁴.

2.4.2 Tático

O planejamento tático do transporte aéreo de passageiros é composto pelo dimensionamento de frota e pela elaboração das tabelas de vôo semanais que são reconfiguradas anualmente.

A decisão de dimensionamento de frota foi estudada por ROCHA (2001), que adequou o modelo de ETEZADI e BEASLEY (1983) para o dimensionamento de frota de helicópteros para atendimento de vôos de trocas regulares de turma das unidades marítimas da Bacia de Campos atendidas na época pelo Heliponto de São Tomé.

Atualmente o dimensionamento de frota é realizado para um horizonte de 2 anos, sendo atualizado anualmente. Neste dimensionamento considera-se como restrição a disponibilidade de mercado dos modelos de helicóptero.

Já a elaboração da tabela de vôo é feita anualmente e revisada quando uma sonda muda de locação e, nesta nova locação, o atendimento necessita ser realizado por outra base aérea. A tabela é composta por horários de vôo para atendimento a cada UM por dia da semana e heliporto de origem. As restrições que devem ser atendidas na montagem da tabela de vôo são: restrições de horário de recebimento de cada UM;

⁴ A utilização dos helipontos das plataformas para pousos e decolagens está sujeita a homologação, seguindo as Normas da Autoridade Marítima, NORMAN 01 (MARINHA DO BRASIL, 2010). Esta regulamentação é rigorosa no que se refere aos pesos e dimensões máximos admissíveis dos helicópteros que neles possam operar. Essas limitações são definidas em função da resistência estrutural, formato geométrico e dimensões de cada heliponto. Com a evolução da indústria aeronáutica, surgiram helicópteros comerciais maiores que apresentam potencial de redução de custos devido ao ganho de escala. Entretanto, algumas plataformas, mais antigas, não possuem capacidade de recebê-los, devido a restrições estruturais (tamanho de helipontos).

capacidade de vôos dos heliportos, capacidade de vôos no mesmo intervalo de horários numa mesma região do espaço aéreo.

Não foi encontrado referencial teórico sobre a elaboração de tabela de vôo para transporte de passageiros por helicóptero para bacias petrolíferas marítimas. Entretanto, a programação de vôos de avião e das tripulações assim como a programação de trens já foram extensamente estudados podendo servir de base para elaboração de modelos de otimização para tabelas de vôo de helicópteros. Alguns exemplos de estudos nesta área são os de SHERALI *et. al.* (2010), TAM *et. al.* (2011) e YAN e TU (2001).

2.4.3 Estratégico

O planejamento estratégico contempla a definição da rede logística no longo prazo, com mapeamento da necessidade de novos aeroportos e da sua melhor localização e pré-dimensionamento da frota para planejamento de contratação.

Na pesquisa bibliográfica realizada previamente, não foi encontrado material a respeito da decisão estratégica. Sendo está uma das motivações para o estudo desta dissertação, que teve início com a descrição e análise do modelo atual de localização de aeródromos e definição da rede logística de movimentação de passageiros para unidades de exploração e produção de petróleo e gás natural *offshore*. (SENA e FERREIRA FILHO, 2010)

A logística de pessoas para trabalho em exploração e produção de petróleo *offshore* tem como principal meio de transporte aeronaves de asa rotativa (helicópteros). Este modal tem, como características, custos elevados com locação, manutenção e consumo de combustível⁵. Estas características tornam os custos da frota aérea sensíveis à localização dos aeródromos e alocação das demandas a estes aeródromos, que depende da capacidade destes.

A definição da capacidade aeroportuária envolve três questões descritas a seguir, sendo que a mais restritiva define a capacidade do aeroporto (HORONJEFF e MCKELVEY, 1993):

⁵ O combustível utilizado pelos helicópteros e demais aeronaves com motores a turbina é o querosene de aviação (QAV).

- a) Capacidade de pista e estacionamento de aeronaves: capacidade de pousos e decolagens de um aeroporto, considerando espaçamento de segurança entre as aeronaves e número de posições de estacionamento.
- b) Capacidade de tráfego aéreo: habilidade do controle de tráfego aéreo em proporcionar serviço às aeronaves, em condições normais, sendo expressa como número máximo de aeronaves que podem entrar em um setor do espaço aéreo em um período especificado.
- c) Capacidade do terminal de passageiros: capacidade de espera, embarque e desembarque de passageiros, representado em termos de área do terminal, para um dado nível de serviço definido.



Figura 10: Três pilares para a definição da capacidade aeronáutica (Fonte: Adaptado de HORONJEFF e MCKELVEY, 1993)

Atualmente, na Petrobras, realiza-se o planejamento estratégico da logística a partir da análise dos resultados de modelo de localização-alocação de demandas de passageiros que é rodado para um horizonte de 20 anos, e atualizado anualmente. Este modelo, entretanto, apresenta algumas simplificações em sua formulação que podem comprometer a precisão dos resultados gerados. (SENA e FERREIRA FILHO, 2010)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma definição de Sistemas de Apoio a Decisão (Seção 3.1). Em seguida (seção 3.2), são descritas as redes de distribuição logística e discutidos alguns dos principais estudos já realizados sobre o tema. Na seção 3.3 é conceituado o modelo de localização e apresentadas as principais metodologias de resolução encontradas na bibliografia.

3.1 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO

De acordo com MINTZBERG (1973) apud EIERMAN *et. al.*(1995), uma das principais funções da atividade gerencial é a tomada de decisão. Como as relações das empresas com seus *stakeholders* estão cada dia mais complexas, as variáveis envolvidas nos processos de tomada de decisão são crescentes, tornando-se de extrema importância encontrar ferramentas que dêem subsídios às decisões dos gestores.

BIDGOLI (1998) apud BARBOSA e ALMEIDA (2002), define Sistemas de Apoio à Decisão (SADs) como aqueles que possuem foco no suporte às decisões através de simulações com a utilização de modelos. Segundo o autor, os SADs são construídos para dar suporte às decisões gerenciais semi-estruturadas ou não-estruturadas, sobre assuntos dinâmicos, que sofrem constantes mudanças de cenário ou que não podem ser facilmente especificados. Os SADs apresentam maior capacidade analítica, o que permite empregar vários modelos diferentes para análise de informação.

Segundo GEOFRION *et. al.* (1995), as ferramentas de suporte à decisão têm como propósito detectar oportunidades de ganhos para as empresas em tempo consideravelmente curto. Os autores também pontuam que os gestores não são propensos a aceitar respostas que eles não compreendam satisfatoriamente. Como os modelos são representações simplificadas do problema real, podem gerar resultados que, apesar de ótimos para os dados imputados, não o são para o problema geral devido à não consideração de algum parâmetro ou restrição importante. Logo, a análise das

restrições reais e do impacto nos resultados de simplificações no modelo é etapa importante na construção de um SAD. Adicionalmente, a estrutura do SAD deve ser validada pelos usuários para que este tenha suporte gerencial e seja efetivamente utilizado na empresa.

A logística está, nos últimos anos, dentre os principais temas na gestão das empresas, sendo os SADs ferramentas importantes no auxílio aos gestores para que suas decisões sejam acertadas, para que os custos logísticos sejam reduzidos e para que a empresa mantenha competitividade. Na Seção 3.2 serão discutidos alguns dos principais problemas logísticos aos quais se aplicam os SADs.

3.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA

A configuração de redes logísticas de distribuição, incluindo a definição de localização das instalações, está entre os principais desafios da logística em geral. Sua relevância advém dos elevados investimentos envolvidos e dos consideráveis impactos que tais decisões têm sobre os custos da empresa. De acordo com INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN - ILOS (2010), em pesquisa realizada em 2009 com 172 empresas de ramos diversos, chegou-se a uma estimativa de gastos médios com logística correspondentes a 8,3% da receita líquida. Em estudo equivalente realizado em 2005, o percentual de gastos com logística era de 7,5%, demonstrando uma tendência de crescimento destes custos. Nesta pesquisa, o custo logístico total contempla transporte, estoque e armazenagem, sendo a maior relevância decorrente dos custos de transporte, como se pode observar na Figura 11.

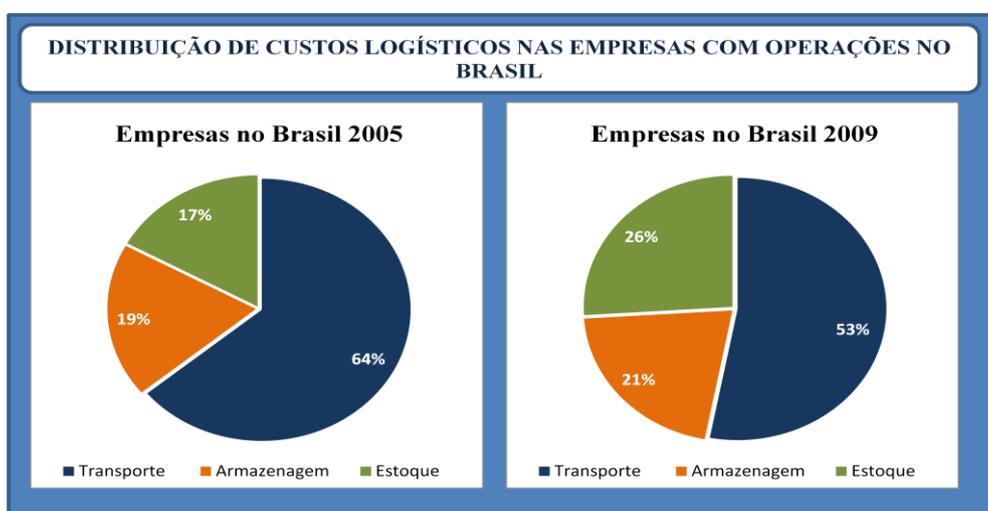


Figura 11: Distribuição dos custos logísticos para empresas brasileiras (Fonte: ILOS, 2010)

De acordo com BALLOU (1999) apud LOPES e SANTOS (2006), as redes de distribuição e localização de instalações foram estudadas inicialmente por THUNEN (1875), WEBER (1929), PALANDER (1935), LOSCH (1940), HOOVER (1957), GREENHUT (1956) e ISARD (1960). O impulsionador da maior parte destes trabalhos foi a influência dos custos de transporte na localização das instalações. Os conceitos sugeridos por estes autores são ainda hoje aplicados, mesmo sendo os problemas de maior complexidade que os da época.

SIMCHI-LEVI *et. al.* (2000) afirmam que a rede logística é formada por fornecedores, depósitos, centros de distribuição e pontos de varejo, além de insumos, estoques em processo e produtos finais que circulam entre as instalações. CHAPMAN (1994) apud LOPES e SANTOS (2006) pontua que para muitas companhias, administrar a logística implica gerenciar uma rede complexa de unidades e fluxo de materiais e mercadorias finais entre estas unidades.

A configuração da rede logística passa por algumas decisões fundamentais descritas a seguir: determinação do número apropriado de facilidades; localização geográfica destas; definição de seu tamanho; alocação de espaço para os produtos em cada facilidade; e, determinação de quais produtos os clientes receberão de cada facilidade (SIMCHI-LEVI *et. al.*, 2000). A seguir (Seção 3.3), será feita uma revisão da literatura sobre o problema de localização de facilidades e configuração da rede logística.

3.3 O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO

3.3.1 Histórico

A localização de facilidades é um problema clássico de otimização, que representa uma das questões chave na definição de uma rede de operações (SLACK *et. al.*, 2002; DUPONT, 2008).

Embora alguns pesquisadores tenham proposto e solucionado o problema de localização já no século XVII, e de não se saber ao certo quem foi o primeiro a formular o problema, a Teoria da Localização começou a ser formalmente estudada por Alfred Weber em 1909. Entretanto, foi a partir de 1964 que ela ganhou maior interesse dos

pesquisadores, após a publicação de HAKIMI (1964), que estudou a localização de centrais de chaveamento em uma rede de comunicação e cabines policiais em uma malha rodoviária. (FARAHAMI e HEKMATFAR, 2009; DREZNER *et. al.*, 2004)

O problema de Weber pode ser definido de forma simplificada como o desejo de localizar uma facilidade no ponto que minimize o custo de transporte para os clientes. A função objetivo será então de minimização do somatório das distâncias facilidade-cliente, ponderadas pelos custos unitários de transporte por unidade de distância. (DREZNER *et. al.*, 2004)

3.3.2 Classificação dos problemas de localização

Um grande volume de generalizações, variações e extensões do problema inicial de Weber surgem a cada ano. Portanto, uma sistematização foi necessária para facilitar o trabalho dos pesquisadores. Neste sentido, um esforço considerável já foi feito na elaboração de classificações e taxonomias para os modelos de localização. FRANCIS e WHITE (1974) estão entre os pioneiros nesta linha. Estes autores apresentaram uma taxonomia para problemas de layout e localização composta por seis elementos principais: (1) Características da nova facilidade; (2) Características de Facilidades Existentes; (3) Interação entre Facilidades Existentes e Novas; (4) Características do Espaço de Solução; (5) Medida de distância; (6) Objetivo. (TAFAZZOLI e MOZAFARI, 2009)

Posteriormente, DASKIN (1995), *apud* TAFAZZOLI e MOZAFARI (2009), apresentou uma taxonomia bastante abrangente, baseada em 14 critérios que é resumida na Tabela 2.

Tabela 2: Taxonomia proposta por DASKIN (1995) *apud* TAFAZZOLI e MOZAFARI (2009)

#	Critério	Classificação		
1	Estrutura Topológica	Planar	Discreta	Rede
2	Tipo de rede	Árvore		Grafo
3	Medida de distância	Manhattan	Euclidiana	Lp
4	Número de facilidades	Única		Múltiplas
5	Dependência do tempo	Estático		Dinâmico
6	Nível de certeza	Determinística		Probabilística
7	Produtos	Único		Múltiplos
8	Setor	Público		Privado
9	Número de objetivos	Único		Múltiplos
10	Elasticidade da demanda	Inelástica		Elástica
11	Capacidade das Facilidades	Capacidades		Não capacitadas
12	Tipo de Alocação da demanda	Facilidade mais próxima		Alocação geral da demanda
13	Estrutura Hierárquica	Um nível		Hierárquica
14	Facilidade Desejável?	Desejável		Indesejável

HOLMBERG *et. al.* (1999) afirma que os modelos de localização podem ser segregados em diferentes categorias de acordo com as restrições assumidas. Uma divisão possível é entre UFLP (*Uncapacited Facility Location Problem*) e CFLP (*Capacited Facility Location Problem*). No UFLP, assume-se que as facilidades potenciais não apresentam restrição de capacidade. Neste caso, cada cliente será atendido por uma única facilidade, que lhe gerar o menor custo. Por outro lado, no CFLP, cada facilidade potencial apresenta uma capacidade máxima. Logo, clientes podem ser atendidos por mais de uma facilidade. Caso a mais próxima atinja sua capacidade máxima, parte da demanda pode ser realocada para a segunda facilidade de menor custo.

Mais recentemente, REVELLE *et. al.* (2008) identificaram dois grupos de problemas de localização: (1) problemas de mediana e localização de plantas; (2) problemas de centro e cobertura. O primeiro grupo foca-se em minimização da distância ponderada pela demanda, sendo apropriado quando o objetivo é de minimização de custos ou maximização de lucros. O segundo grupo é muito utilizado para localização de serviços de emergência e nele, a qualidade da solução não é melhor que a da entidade com o pior serviço, ou seja, deve-se minimizar a maior distância aos clientes.

Os modelos de localização também podem ser divididos em quatro categorias (REVELLE *et. al.*, 2008):

- a) Modelos analíticos se baseiam em uma grande quantidade de simplificações como: demanda uniformemente distribuída; custos semelhantes de abertura de facilidades, não importando a localização; e, custos de transporte por quilometro constantes independentemente do trajeto. Eles trazem *insights* importantes sobre a relação entre a quantidade de facilidades, sua localização e os custos totais, entretanto, são limitados.
- b) Modelos contínuos consideram que as facilidades podem ser alocadas em qualquer localidade dentro da área de serviço, enquanto a demanda está em pontos discretos. Estes modelos têm aplicabilidade restrita a problemas onde as facilidades realmente podem ser alocadas a qualquer ponto no espaço.
- c) Modelos de rede consideram que o problema de localização está inserido numa rede composta por nós e arcos. Há casos em que a demanda se encontra nos nós, nos arcos ou em ambos. As pesquisas nesta área, em geral buscam estruturas especiais que possam gerar algoritmos de tempo reduzido para grupos particulares de problemas.
- d) Modelos discretos consideram demanda discreta e um grupo finito de pontos candidatos a instalação de facilidades. Estes são aplicáveis a diversos contextos práticos, havendo vasta bibliografia relacionada.

Os modelos de rede são discretos, pois consideram que demanda e instalações estão localizadas em um conjunto finito de localizações, entretanto a diferenciação entre as classes c e d definidas acima, está nos percursos entre facilidades e clientes. Modelos discretos são planares, consideram em geral inexistência de restrições de percurso e possibilidade de utilização das menores distâncias (distâncias lineares).

Adicionalmente, o tema localização pode ser dividido em três áreas: o problema de localização, o problema de alocação e o problema de locação-alocação. O problema de Locação-Alocação consiste em localizar um conjunto de novas facilidades de forma a minimizar os custos de transportes, abrindo facilidades suficientes para satisfazer a demanda dos clientes. (FARAHAMI e HEKMATFAR, 2009; AZARMAND e JAMI, 2009)

Com relação à modelagem da demanda nos problemas de localização, muitas formulações consideram-na estática e determinística. Entretanto, pela natureza

estratégica, os problemas de localização de facilidades requerem a consideração de alguns aspectos de incerteza futura na modelagem. Afinal, o investimento requerido para a abertura de uma facilidade torna-se viável apenas se esta se mantiver operacional por um período de tempo extenso. (FARAHANI e HEKMATFAR, 2009)

Quando a incerteza da demanda é considerada na modelagem, classifica-se o modelo de localização como dinâmico. OWEN e DASKIN (1998), *apud* FARAHANI *et. al.* (2009), apontam duas causas para as incertezas futuras que dividem em categorias os problemas dinâmicos: (1) incerteza relacionada ao planejamento para condições futuras; (2) incerteza relacionada ao conhecimento limitado dos parâmetros. No primeiro caso, pode-se dizer que o modelo é determinístico e dependente do tempo. Já no segundo caso o modelo é estocástico.

FARAHANI e HEKMATFAR (2009) aprofundam-se nos modelos dinâmicos determinísticos e dependentes do tempo. Estes podem ser classificados de acordo com: o número de realocações permitidos às facilidades; o número de facilidades realocáveis; tempo de realocação discreto ou contínuo e horizonte de tempo finito ou infinito.

3.3.3 Métodos de Resolução dos Problemas de Localização

GALVÃO (2003) apresenta contribuições importantes na resolução do UFLP desenvolvidas em 30 anos de carreira acadêmica dedicados ao problema. Dentre elas, abordagens baseadas no problema dual, relaxação lagrangeana, heurísticas e meta-heurísticas. Estruturas de pesquisa em vizinhança utilizadas em busca local e em busca tabu na resolução do UFLP foram comparadas por GHOSH (2003). Já o autor MARIC (2010) apresentou um algoritmo genético para resolução do UFLP de múltiplos níveis, ou seja, com depósitos centrais que atendem a depósitos regionais de diversos níveis até chegar aos clientes.

O UFLP, assim como o CFLP, pode ser classificado como NP - Completo através da demonstração de sua relação com o problema de empacotamento-cobertura e particionamento, conforme KRARUP e PRUZAN (1983), *apud* VERTER (2011). Portanto, métodos exatos de programação inteira, como o *branch and bound*, podem não convergir para soluções razoáveis em tempo computacional adequado, para instâncias muito grandes do problema.

Com relação ao CFLP, KUEHN e HAMBUEGER (1963), *apud* VERTER (2011), apresentaram a primeira heurística para sua resolução. Esta heurística é composta de uma fase construtiva e outra de melhoramento. A primeira fase, de avaliação detalhada da solução é sempre realizada para um subgrupo de facilidades reduzido e escolhido de forma míope. BORNSTEIN e AZLAN (1998) utilizaram testes de redução combinados a *simulated annealing* para sua heurística de resolução do CFLP. Diversas outras heurísticas foram analisadas, entretanto, esta dissertação se concentrará na análise de métodos exatos que são o foco do trabalho.

Métodos exatos para o problema de localização, em geral, utilizam *branch and bound* clássico (com obtenção de limitantes inferiores por relaxação linear) ou associado à relaxação lagrangeana⁶. Métodos que utilizam *branch and bound* clássico, em geral, estão restritos a instâncias pequenas do problema devido ao grande crescimento do número de soluções viáveis a serem pesquisadas pelo método com o aumento do número de variáveis. Para grandes instâncias, alguns autores, como GEOFFRION e GRAVES (1974), *apud* BISSCHOP (2009), têm utilizado decomposição de Bender como alternativa para resolução do problema.

DUPONT (2008) utiliza *branch and bound* associado a uma heurística de busca local para redução do número de nós a serem pesquisados. Em um UFLP com custo de produção por facilidade que segue curva de crescimento côncava, representando o ganho de escala. O autor conclui que o método é conveniente para resolução de problemas com até 20-25 facilidades e mais de 250 clientes. Segundo o autor, este algoritmo, implementado em Pascal, roda em um PC, não sendo necessários *solvers* comerciais extras.

HOLMBERG *et. al.* (1999) e TRAGANTALERNGSAK *et. al.* (2000) comparam em seus artigos o desempenho de algoritmos convencionais de *branch and bound*, como o do código comercial CPLEX, e deste algoritmo associado à relaxação lagrangeana. Com isto, produz-se um problema lagrangeano mais fácil de resolver e cujo valor da solução ótima é um limite inferior (em minimização) para o *branch and bound*. O primeiro autor ainda adiciona uma heurística primal forte que gera limitantes superiores para o *branch and bound*.

⁶ A relaxação lagrangeana consiste na dualização das restrições difíceis, ou seja, o acréscimo destas à função objetivo através de um vetor de multiplicadores, chamados de multiplicadores de Lagrange, e sua consecutiva eliminação do conjunto de restrições.

A decomposição de Bender foi aplicada a um problema não capacitado de localização de hubs para sistemas de telecomunicação por CAMARGO *et. al.* (2008). Estes autores concluíram que o método é eficiente, tendo encontrado solução para instâncias do problema nunca resolvidas antes por outros métodos exatos. Este método foi utilizado anteriormente por outros autores, como GEOFFRION e GRAVES (1974), apud VERTER (2011), que resolveram um problema de localização de rede contendo três escalões (fábricas centros de distribuição e clientes).

Uma vasta bibliografia sobre modelos de localização, suas diversas variações e métodos de resolução pode ser encontrada em HALE (2011), que apresenta mais de 3400 referências sobre localização de facilidades e assuntos correlatos. Alguns livros recentes sobre o tema, como EISELT (2011), FARAHANI e HEKMATFAR (2009) e DREZNER e HAMACHER (2004) também são boas fontes bibliográficas.

4. PROBLEMA BÁSICO DE LOCALIZAÇÃO DE AERÓDROMOS

Neste capítulo descreve-se o modelo básico de localização de aeródromos e planejamento de rede logística de transporte de passageiros e apresentam-se suas limitações.

4.1 MODELAGEM CONCEITUAL

O modelo de passageiros foi desenvolvido pelo Centro de Estudos em Logística (CEL) da COPPEAD-UFRJ com o objetivo inicial de auxiliar a Petrobras na tomada de decisão de localização de aeródromos para suprir o crescimento da demanda por transporte de passageiros para as plataformas de produção, sondas de perfuração e completação de poços no longo prazo.

O problema de locação de aeródromos consiste em uma variante do problema de locação-alocação de facilidades.

Os custos de abertura e manutenção de aeródromos não são considerados neste modelo de otimização por serem muito variáveis com a demanda e frota alocada, não tendo um comportamento linear que possa ser representado no modelo. Estes custos devem ser calculados a partir dos resultados do modelo e comparados para diferentes cenários de frota e capacidade mínima e máxima de movimentação de passageiros parametrizados. Portanto, a função objetivo do modelo é de minimização dos custos fixos e variáveis de helicópteros.

Considerando que os helicópteros são alugados, os custos logísticos do transporte aéreo de passageiros são compostos por: custo fixo de diária dos helicópteros, custo variável por hora voada dos helicópteros e custo de Querosene de Aviação (QAV).

Como restrições têm-se a imposição do atendimento a toda demanda e o respeito às autonomias de vôo das aeronaves. Cada modelo de aeronave possui características

próprias relativas a número de assentos, capacidade dos tanques de combustível, consumo de combustível por quilômetro, velocidade de cruzeiro e PBO.

Como o modelo de localização já apresenta complexidade elevada, considera-se o tipo de aeronave utilizado como uma premissa, sendo sua capacidade e custo parâmetros de entrada do modelo. Desta forma, é possível testar instâncias com apenas um modelo de aeronave na frota ou considerar como parâmetros de entrada as características ponderadas de um mix de frota pré-estabelecido. Apesar de mix de frota não ser uma saída deste modelo, pode-se analisar o mix mais adequado testando configurações diferentes e comparando seus custos.

Considera-se como capacidade do helicóptero a quantidade média de passageiros que ele pode carregar. Esta média contempla um peso médio por passageiro e bagagem. Além disto, é embutido um fator de utilização do modal para refletir as variabilidades de demanda e operação que impossibilitam a ocupação total dos helicópteros em todos os vôos. Esta ocupação é definida a partir de dados históricos de ocupação das aeronaves.

A autonomia das aeronaves em quilômetros é um parâmetro de entrada que funciona como limite máximo de distância para que um aeródromo atenda a uma unidade marítima. Em atendimento a aspectos de segurança de vôo, a missão do helicóptero só pode ser realizada caso o mesmo tenha combustível suficiente para: realizar o trajeto do aeródromo até a unidade marítima, retornar ao aeródromo de origem e, adicionalmente, apresentar reserva técnica para vôo, de trinta ou quarenta e cinco minutos, a depender do porte da aeronave. Esta regra está de acordo com a instrução para vôos IFR de COMANDO DA AERONÁUTICA (2009) e será a base para o cálculo da autonomia do helicóptero utilizado no modelo. Consideram-se, neste caso, as regras de vôo IFR por serem mais restritivas que as de vôo VRF com relação à reserva de combustível necessária.

Na análise da demanda mensal de movimentação de passageiros no ano de 2009 foi encontrada uma variação em relação à média de -6,00% a + 6,29% e um coeficiente de variação de 8,33%, como se pode observar na Figura 12. Como esta variação não foi considerada elevada, utiliza-se no modelo, como simplificação, uma demanda anual de passageiros uniforme por unidade marítima e tipo de vôo, sendo os tipos de vôo considerados: troca de turma, eventual, comitiva e outros, descritos na seção 2.2.5.

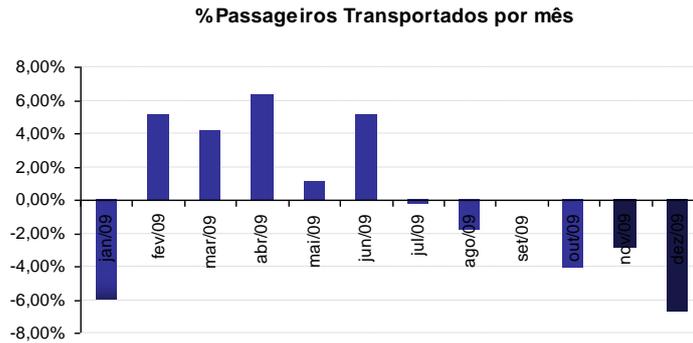


Figura 12: Variação mensal da movimentação de passageiros da Petrobras no Sul-Sudeste em 2009 (Fonte: SENA e FERREIRA FILHO, 2010)

Os helicópteros possuem como restrição contratual um máximo de horas voadas no mês. Como se considera que a demanda mensal é constante, este limite é representado no modelo por uma restrição de máximo de horas voadas no ano.

A localização de um aeródromo é uma decisão de longo prazo, já que os investimentos para sua construção ou adequação não trazem retorno em apenas um ano de operação. Da mesma forma, em caso de contratação de aeródromos existentes, contratos de curto prazo tornam-se muito caros e, portanto, inviáveis. Logo, através do modelo de otimização a ser apresentado, deve-se analisar o comportamento da demanda por um período de médio a longo prazo para que seja tomada a decisão de localização. No caso da Petrobras, foi considerado razoável um horizonte de 20 anos.

As possíveis localizações mapeadas de aeródromos apresentam capacidades máximas (passageiros/ano) devido a limitações de infra-estrutura e capacidade de controle do espaço aéreo ou limitação em espaço físico para construção. Aeródromos também apresentam capacidades mínimas, referentes ao mínimo de demanda que deve ser atendida de forma a viabilizar o investimento em construção ou contratação do mesmo, ou mínimos contratuais, para aeroportos em operação.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a modelagem matemática, é utilizado como base o problema de localização capacitado com algumas adaptações específicas para a localização de aeródromos.

Segue abaixo, modelagem matemática do problema de localização de aeródromos. Esta é uma modelagem simplificada da ferramenta utilizada atualmente pela Petrobras (SENA e FERREIRA FILHO, 2010) que foi adaptada para o estudo em questão.

As seguintes notações são utilizadas:

- $w=1,2,\dots, r$ o conjunto de unidades marítimas;
- $j= 1,2,\dots,s$ o conjunto de possíveis aeródromos;
- $t=1,2,\dots,k$ o conjunto de anos de análise;
- $m=1,2,\dots,l$ o conjunto de modais (aeronaves), e;
- $p= 1,2,\dots,g$ o conjunto de produtos (tipo de passageiro e unidade de operação a qual está associado).

Os parâmetros de entrada são:

- lat_{w_w} → a latitude da unidade marítima w em radianos;
- lon_{w_w} → a longitude da unidade marítima w em radianos;
- lat_{j_j} → a latitude do aeródromo j em radianos;
- lon_{j_j} → a longitude do aeródromo j em radianos;
- c_m → a capacidade da aeronave m em número de passageiros por vôo;
- $util_m$ → a taxa de utilização da aeronave m em % de assentos ocupados por vôo;
- CF_m → o custo fixo anual por tipo de aeronave m ;
- CV_m → o custo variável por quilômetro percorrido, composto pelo custo da hora voada da aeronave m , convertido para custo por quilometro e adicionado ao o custo do combustível;
- vl_m → a velocidade média da aeronave m no vôo (Considera que durante pouso, aproximação e decolagem a aeronave tem velocidade menor que a de cruzeiro);
- h_m → o limite de horas voadas por mês por aeronave do tipo m ;
- q_{wpt} → a demanda de passageiros do tipo p para a unidade w no ano t ;
- max_{jt} → a capacidade máxima do aeródromo j no ano t , é indexada pelo ano para representar a impossibilidade de abertura de aeródromos novos até determinado ano ou a mudança de capacidade do aeródromo de um ano para outro devido a obras de ampliação;

- \mathbf{min}_{jt} → a capacidade mínima do aeródromo \mathbf{j} no ano \mathbf{t} , caso seja aberto, este é indexada pelo ano pelo mesmo motivo do parâmetro \mathbf{max}_{jt} ;
- \mathbf{lim} → o número máximo de aeródromos abertos;
- \mathbf{aut}_m → a quilometragem máxima do voo suportada pelo modelo \mathbf{m} de aeronave.
- $\mathbf{t-um}_m$ → Tempo parado, em horas, em cada UM em cada visita para embarque ou desembarque de passageiros do modal \mathbf{m} .
- $\mathbf{t-aer}_m$ → Tempo, em horas, gasto no início/fim da viagem pelo modal \mathbf{m} , num aeroporto, para embarque ou desembarque de passageiros e preparação da aeronave para voo.
- \mathbf{BigM} → Será igual ao somatório das demandas. Este parâmetro será utilizado para penalizar a abertura de um aeródromo novo na função objetivo.

$$\mathbf{BigM} = \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{t=1}^k \mathbf{q}_{wpt}$$

O modelo tem uma etapa de pré-processamento onde são calculados os seguintes parâmetros auxiliares:

- \mathbf{d}_{jw} → distância linear da viagem (ida + retorno), saindo o aeródromo \mathbf{j} e a unidade marítima \mathbf{w} , considerando a curvatura da terra⁷.

$$\mathbf{d}_{jw} = 2 * 6378 * \arccos(\cos(\mathbf{lon}_{j_j} - \mathbf{lon}_{w_w}) * \cos(\mathbf{lat}_{j_j}) * \cos(\mathbf{lat}_{w_w}) + \mathbf{sen}(\mathbf{lat}_{j_j}) * \mathbf{sen}(\mathbf{lat}_{w_w}))$$

Onde: O valor 6378 representa o raio da terra em quilômetros.

- \mathbf{NV}_{jwpm_t} → número de viagens máximo que uma aeronave consegue realizar no ano, caso dedique-se exclusivamente a esta rota, para atendimento da demanda da unidade marítima \mathbf{w} , partindo do aeródromo \mathbf{j} e utilizando o modal \mathbf{m} . Este valor será utilizado pelo modelo para o cálculo de frota.

$$\mathbf{NV}_{jwpm_t} = (12 * \mathbf{h}_m) / (\mathbf{d}_{jw} / \mathbf{vl}_m + \mathbf{t-um}_m + \mathbf{t-aer}_m)$$

- $\mathbf{PermiteFluxo}_{jwpm_t}$ → Parâmetro binário que será 1 (um) quando as três condições a seguir forem atendidas: houver demanda \mathbf{q}_{wpt} ; o aeródromo \mathbf{j} apresentar capacidade disponível no ano \mathbf{t} , ou seja, existir \mathbf{max}_{jt} e; a distância entre a unidade \mathbf{w} e o aeródromo \mathbf{j} estiver na região de cobertura da aeronave \mathbf{m} ($\mathbf{d}_{jw} \leq \mathbf{aut}_m$).

⁷ A longas distâncias, a Geometria Euclidiana (geometria sobre planos) não é adequada, sendo necessário considerar a curvatura da Terra para o cálculo da distância entre dois pontos.

O modelo tem como variáveis:

- k_{jwptm} → Variável contínua que representa a quantidade da demanda pelo produto p da unidade w atendida pelo aeródromo j , através do modal m no ano t . Esta variável poderá assumir valores entre 0(zero) e a demanda da unidade w pelo produto p no ano t (q_{wpt}). A geração desta variável está condicionada a que o parâmetro **PermiteFluxo** $_{jwptm}$ seja igual a 1. Este artifício de formulação reduz consideravelmente o número de variáveis geradas, tornando o modelo mais enxuto e conseqüentemente, reduzindo o tempo de processamento.
- a_{jwptm} → Variável contínua que representa a quantidade mínima necessária de frota para atendimento da parte da demanda do produto p da unidade w que será movimentada pelo aeródromo j no ano t e através do modal m (k_{jwptm}). Também está condicionada a que o parâmetro **PermiteFluxo** $_{jwptm}$ seja igual a 1. Esta parâmetro é contínuo pois representa a fração necessária para atendimento a uma unidade, sendo que os helicópteros são compartilhados por diversas unidades marítimas. Este número é utilizado pelo modelo para o cálculo final da frota inteira.
- y_{jt} → Variável binária indicativa de abertura de aeródromo. Será 1(um) se o aeródromo j for aberto no ano t e zero caso contrário.
- **Frota** $_{jmt}$ → Variável inteira que representa a frota necessária do modal m para atendimento à demanda alocada ao aeródromo j no ano t .

O problema pode então ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Min } [\sum_{j=1}^s \sum_{t=1}^k \sum_{m=1}^l (CF_m \times \text{Frota}_{jmt})] + [\sum_{j=1}^s \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{t=1}^k \sum_{m=1}^l (CV_m \times k_{jwptm} \times \frac{d_{jw}}{c_m \times util_m}] \\ + \text{BigM} \times [\sum_{j=1}^s \sum_{t=1}^k y_{jt}] \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\text{Atendimento_Demanda}_{wpt} \rightarrow \sum_{j=1}^s \sum_{m=1}^l k_{jwptm} = q_{wpt} \quad (2)$$

$$\text{Dimensionamento_de_frota}_{jwptm} \rightarrow a_{jwptm} = k_{jwptm} / (c_m \times util_m \times NV_{jwptm}) \quad (3)$$

$$\text{Autonomia}_{jwptm} \rightarrow d_{jw} \times k_{jwptm} \leq aut_m \times k_{jwptm} \quad (4)$$

$$\text{Frota_Inteira}_{jtm} \rightarrow Frota_{jtm} \geq \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g a_{jwptm} \quad (5)$$

$$\text{Capacidade_maxima}_{jt} \rightarrow \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{m=1}^l k_{jwptm} \leq Max_{jt} \times y_{jt} \quad (6)$$

$$\text{Capacidade_minima}_{jt} \rightarrow \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{m=1}^l k_{jwptm} \geq Min_{jt} \times y_{jt} \quad (7)$$

$$\text{Max_Aerodromos}_t \rightarrow \sum_{j=1}^s y_{jt} \leq lim \quad (8)$$

$$\text{Manut_Aerodromo_Aberto}_{jt2} \rightarrow y_{jt} \leq y_{jt2}, \text{ onde } t2 > t \quad (9)$$

$$y_{jt} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$frota_{jtm} \in \mathbb{Z} \quad (11)$$

$$a_{jwptm}, k_{jwptm} \in \mathbb{R} \quad (12)$$

Onde (1) representa a função objetivo de minimização dos custos de transporte e da quantidade de aeródromos, (2) assegura o atendimento da demanda integral das unidades marítimas, (3) assegura que haja frota suficiente para atendimento da demanda, (4) garante que a autonomia das aeronaves seja respeitada, (5) calcula a frota necessária por aeródromo e modal, considerando ser a frota uma variável inteira. (6) garante que a capacidade máxima de um aeródromo seja respeitada, em caso de sua abertura, (7) garante que a capacidade mínima de um aeródromo seja respeitada, em caso de sua abertura, (8) garante que seja respeitado o limite de aeródromos abertos em cada ano, (9) garante que após a abertura, um aeródromo se mantenha em funcionamento, (10) expressa a natureza binária da variável y_{jt} , (11) expressa a natureza inteira da variável $frota_{jtm}$, (12) expressa a natureza contínua das variáveis a_{jwptm} e k_{jwptm} .

Como o modelo é multiperíodo, as variáveis são indexadas pelo ano. Para o CFLP básico, considera-se o custo de se ligar o cliente i a uma facilidade localizada no local j . Este é substituído pelos custos fixos por aeronave e variáveis por quilômetro percorrido pela aeronave.

Como o modelo é de nível estratégico, tendo como resposta definições de localização de aeródromos para longo prazo, por simplificação, não é realizada roteirização, sendo admitido que cada voo atende a uma única unidade marítima. Historicamente, conforme informações cedidas pela US-LOG, aproximadamente 70% dos voos são diretos, ou seja, atendem apenas a uma unidade marítima. Logo, a aproximação é considerada razoável. Uma alternativa já utilizada nos estudos realizados pela empresa é considerar que cada aeronave atenderá a um número médio de UMs, maior que 1(um), obtido através do histórico e para isto, incluir em cada voo uma quilometragem percorrida referente a distância média histórica entre UMs visitadas em um mesmo voo, o que elevará os custos e tempos de viagem e conseqüentemente a frota. O problema desta abordagem é que se considera a manutenção do fator histórico, sendo que o comportamento da demanda se modifica ao longo dos anos já que as unidades ficam mais dispersas e distantes da costa na região do pré-sal da Bacia de Santos.

A demanda anual de passageiros por unidade marítima, dado de entrada do modelo, deve ser informada em número de vagas disponibilizadas nos voos. Cada vaga pode movimentar até dois passageiros, sendo que um embarca e outro desembarca.

É importante ressaltar que este modelo tem como resultado um dimensionamento de helicópteros por aeródromo. Entretanto, este número não deve ser utilizado para o planejamento de frota por não considerar as variabilidades de demanda ao longo do ano, fatores climáticos, dentre outros que podem alterar a frota. Este número deve ser considerado apenas como um pré-dimensionamento, necessário para a definição de localização e dimensionamento da infraestrutura dos aeródromos.

Devido ao grande número de unidades marítimas e ao fato do modelo ser dinâmico, considerando a demanda de 20 anos (nas instâncias testadas), os números de variáveis e restrições dos cenários tornam-se muito elevados. Portanto, é de extrema importância para a viabilidade do modelo a utilização de técnicas de pré-processamento para redução do número de variáveis e restrições. Neste modelo, as técnicas consistem principalmente na utilização do parâmetro calculado **PermiteFluxo_{jwpm}** como domínio para as variáveis, que somente são criadas quando este parâmetro assume valor 1 (um).

4.3 O SOFTWARE UTILIZADO

O modelo desta dissertação foi desenvolvido no *software* AIMMS (*Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software*) da *Paragon Decision Technology*, na versão 3.11, utilizando-se programação inteira mista.

O AIMMS, segundo BISSCHOP e ENTRIKEN (2002), é uma ferramenta que inclui as duas formas gerais de uso dos modelos matemáticos, já que permite construí-los ao nível estratégico e ao nível tático operacional, através de ferramentas de apoio à decisão iterativas para auxiliar na solução dos problemas. Além disto, de acordo com IGNÁCIO e FERREIRA FILHO (2004), o software possibilita ao usuário final uma visualização abrangente do problema devido ao conjunto de interfaces gráficas que fornece. O AIMMS é utilizado para desenvolvimento do modelo matemático de problemas de otimização. Este software funciona de forma integrada com alguns solvers comerciais.

O modelo básico foi desenvolvido para a Petrobras no AIMMS. Como o objetivo da dissertação é de aprimorar o modelo de forma que este seja adotado pela empresa, utilizou-se o mesmo software, evitando custos de aquisição de software e treinamento de pessoal.

O solver utilizado atualmente pela Petrobras para este modelo é o CPLEX, que segundo HUTTER *et. al.* (2010) é o solver comercial mais extensamente utilizado para problemas de programação inteira mista (MIP).

4.4 ENTRADA E SAÍDA DE DADOS

A entrada e saída de dados no modelo são realizadas através de interface com Banco de Dados Microsoft Office Access. Este formato facilita a geração de cenários pelos usuários finais e a análise e armazenamento de resultados, principalmente quando se trabalha com volume elevado de informações. Para acesso ao banco de dados utiliza-se fonte de dados ODBC⁸, uma das ferramentas administrativas do Windows.

⁸ ODBC (Conectividade Aberta de Banco de Dados) um método padrão de compartilhamento de dados entre bancos de dados e programas.

4.5 LIMITAÇÕES DO MODELO

O modelo em questão é aderente ao propósito de otimização e planejamento de capacidade da rede logística de transporte de passageiros para trabalho em atividade *offshore*. Porém, apresenta limitações e simplificações que podem comprometer o resultado encontrado, já que o custo operacional total é bastante sensível ao perfil da frota e localização do aeroporto, sendo que estes variam consideravelmente com os parâmetros de entrada do modelo.

A primeira limitação encontrada é com relação à distância calculada pelo modelo entre aeródromos e UMs, que é linear. Como a ferramenta utilizada atualmente pela Petrobras foi elaborada entre 2008 e 2009 ela não contempla as alterações nas regras de voo contidas na nova carta aeronáutica da TMA Macaé. Esta simplificação é impactante visto que, com as novas regras de voo, as distâncias entre aeroporto e UM aumentam de forma não proporcional entre os aeroportos candidatos a atendimento, o que altera para algumas UMs a base mais competitiva de atendimento.

A consideração da quantidade de passageiros movimentada por cada aeródromo e modal como uma variável contínua também é uma aproximação, que se possível deve ser retirada. Afinal, não se pode transportar meio passageiro.

Outra limitação do modelo é com relação aos aeródromos. Estes têm como restrição de capacidade apenas o número de passageiros transportados por ano, que está relacionada à capacidade de seu terminal de passageiros. Entretanto, os aeródromos também apresentam restrições de pátio de estacionamento de aeronaves. A inclusão desta restrição trará maior precisão ao modelo.

Atualmente, o modelo é rodado com um único modal, ou com modais definidos por grupo de unidades marítimas. Quando necessário, representa-se no modelo um mix pré-definido de aeronaves consolidado num único modal, que possui como parâmetros as características ponderadas dos modais contidos no mix. Quando liberado, o modelo poderá escolher o modal que apresentar o menor custo-benefício. Entretanto, na operação real não é possível operar com apenas um tipo de aeronave, pois algumas unidades marítimas possuem restrições de helipontos, ficando impossibilitadas de receber determinados tipos de aeronave. Estas restrições devem ser incorporadas ao

modelo para torná-lo mais robusto. Sua inclusão contribui para o objetivo desta tese e sua implementação encontra-se detalhada no próximo capítulo.

5. MODELO APERFEIÇOADO DE LOCALIZAÇÃO DE AERÓDROMOS

Neste capítulo são apresentadas as mudanças implementadas na modelagem básico do problema de localização de aeródromos com o objetivo de eliminar simplificações que geravam incerteza aos resultados obtidos. Estas melhorias estão descritas na ordem cronológica em que são implementadas no modelo nas seções a seguir.

5.1 REVISÃO DO CÁLCULO DE DISTÂNCIAS AERÓDROMO-UM PARA BACIA DE CAMPOS

Esta revisão é de grande importância visto que pode alterar a distância relativa das UMs a diferentes aeródromos, tornando-os mais ou menos atrativos. Entretanto, como o cálculo da distância é realizado no pré-processamento do modelo, através de parâmetros calculados, a alteração não causa aumento no tempo de processamento. A seguir, são descritas as revisões realizadas no modelo.

É inclusa a seguinte notação:

$n= 1,2 \dots,z$ o conjunto de portais⁹

Os parâmetros de entrada inseridos são:

- **lat_n** → a latitude do portal **n** em radianos;
- **lon_n** → a longitude do portal **n** em radianos;
- **Indica_UM_Portal_w** → parâmetro binário que será 1 se a unidade **w** deve ser atendida passando-se pelos portais e 0 caso contrário;
- **Escolha_UM_Portal_{wn}** → parâmetro binário que será 1 se a unidade for atendida pelo portal **n** e zero caso contrário. Como cada unidade terá um portal de entrada

⁹ Portais são pontos definidas na nova carta aeronáutica da TMA Macaé com coordenadas fixas. Os helicópteros devem voar em linha reta do aeródromo de origem até estes pontos. Após a passagem pelo portal as aeronaves seguem pelos corredores de vôo até o ponto destes de maior proximidade da unidade de destino, de onde devem iniciar o processo de pouso.

e outro de saída, o somatório deste parâmetro para um determinado w será 2, caso este pertença a região de atendimento por portais e 0 (zero) caso contrário.

Os parâmetros calculados inseridos são:

- $d_{nw_w} \rightarrow$ É o somatório da distância da unidade ao portal de entrada com a distância entre a unidade e o portal de saída;

$$d_{nw_w} = \sum_{n=1}^Z [6378 * Escolha_{UM_{Portal_{wn}}} * \arccos(\cos(lon_{w_w} - lon_{n_n}) * \cos(lat_{w_w}) * \cos(lat_{n_n}) + \sin(lat_{w_w}) * \sin(lat_{n_n}))]$$

- $d_{jn_{jw}} \rightarrow$ somatório das distâncias em quilômetros entre o aeródromo j e os portais n , de entrada e saída relacionados a unidade marítima w ;

$$d_{jn_{jw}} = \sum_{n=1}^Z [6378 * Escolha_{UM_{Portal_{wn}}} * \arccos(\cos(lon_j - lon_{n_n}) * \cos(lat_j) * \cos(lat_{n_n}) + \sin(lat_j) * \sin(lat_{n_n}))]$$

- $d_{jnw_{jw}} \rightarrow$ distância total da viagem (ida + volta) em quilômetros do aeródromo j , passando pelos portais de entrada e saída até a UM w ;

$$d_{jnw_{jw}} = d_{jn_{jw}} + d_{nw_w}$$

O parâmetro calculado alterado é d_{jw} , que passa a ter a seguinte equação:

$$d_{jw} = (1 - Indica_{UM_{Portal_w}}) * 2 * 6378 * \arccos(\cos(lon_j - lon_{w_w}) * \cos(lat_j) * \cos(lat_{w_w}) + \sin(lat_j) * \sin(lat_{w_w})) + Indica_{UM_{Portal_w}} * d_{jnw_{jw}}$$

5.2 TRANSFORMAR VARIÁVEL CONTÍNUA K EM INTEIRA

A variável k_{jwptm} é definida no modelo base como contínua. Isto significa que a demanda pode ser dividida de forma que $\frac{1}{2}$ passageiro seja enviado por um aeródromo e a outra metade por outro. Como isto não é possível, e pode gerar incertezas e soluções sub-ótimas, foi feita a alteração no modelo. A única mudança necessária no modelo a transformação da variável contínua em inteira. Entretanto, esta continua podendo variar de 0 (zero) até q_{wpt} .

Esta revisão aumentou consideravelmente a complexidade do modelo devido ao volume de variáveis inteiras geradas.

5.3 RESTRIÇÃO DE VAGAS

Conforme mencionado na seção 4.4, além de restrições relativas ao número de passageiros, que representam a capacidade do terminal de passageiros, os aeródromos apresentam restrições de capacidade de pátio para estacionamento de aeronaves. Para representar esta limitação, foi incluída a restrição de máximo de vagas por aeródromo por ano. A seguir são apresentadas as modificações necessárias na modelagem.

Parâmetro incluído:

- **Max_Vagas_{jt}** → número máximo de vagas de estacionamento de aeronaves que o aeródromo *j* poderá suportar no ano *t*.

Restrição incluída:

- **Restricao_Vagas_{jt}** → assegura que o número máximo de vagas por aeródromo será respeitado.

$$\sum_{m=1}^l Frota_{jtm} \leq Max_Vagas_{jt} \times y_{jt}$$

5.4 RESTRIÇÕES DE HELIPONTOS DE ALGUMAS UNIDADES MARÍTIMAS

Algumas unidades marítimas, em geral muito antigas, possuem helipontos com restrições de dimensões e peso, não tendo condições de receber helicópteros de grande porte com toda sua ocupação. Na prática, estas unidades são visitadas na maior parte dos atendimentos por helicópteros de médio porte, pois não é financeiramente vantajoso supri-las com aeronaves de grande porte, que apresenta um custo maior, com baixa ocupação de seus assentos.

A forma encontrada de representar esta restrição no modelo foi incluindo uma restrição para estas UMs de recebimento apenas de aeronaves de médio porte, ou seja,

com capacidade menor ou igual a 12 assentos. As modificações realizadas no modelo serão apresentadas a seguir.

Parâmetros incluídos:

- **R_Heliponto_w** → Parâmetro binário que será 1 se a unidade marítima w apresentar restrições em seu heliponto, recebendo apenas aeronaves de médio porte. O parâmetro terá valor 0 (zero) caso o heliponto da unidade marítima seja irrestrito.
- **PermiteModalUM_{wm}** → Parâmetro binário, calculado pelo modelo para o qual será atribuído o valor 1 se $c_m < 12$ e $(1 - R_Heliponto_w)$, caso contrário.

Parâmetros alterados:

- **PermiteFluxo_{jwpm}** → Foi adicionada uma condição para que o parâmetro receba o valor 1. Para isto, além das três condições apresentadas na seção 4.2, o parâmetro **PermiteModalUM_{wm}** deverá ser igual a 1.

Não foi realizada nenhuma inclusão ou alteração de variáveis ou parâmetros. Entretanto, estes são indiretamente influenciados pela alteração do parâmetro **PermiteFluxo_{jwpm}**.

A inclusão desta restrição permite que o modelo faça a escolha do mix de frota.

Como a inclusão desta restrição aumenta consideravelmente o volume de informação processada pelo modelo, sendo necessário um trabalho de pré-processamento de dados para possibilitar sua utilização.

As variáveis **Frota_{jtm}** e **y_{jt}** foram condicionadas à existência de capacidade no aeródromo **j**, ou seja, foi incluído em seu domínio, **max_{jt}**.

As restrições também tiveram seus domínios condicionados, conforme descrito a seguir: **Atendimento_Demanda_{wpt}** será criada apenas quando houver demanda, ou seja, $q_{wpt} > 0$; **Dimensionamento_de_frota_{jwptm}** e **Autonomia_{jwptm}** só existirão quando **PermiteFluxo_{jwpm}** for igual a 1; **Frota_Inteira_{jtm}**, **Manut_Aerodromo_Aberto_{jt2}** e **Capacidade_maxima_{jt}** serão criadas quando **max_{jt}** for maior que zero e; **Capacidade_minima_{jt}** existirá apenas quando **min_{jt}** for maior que zero.

Sem este trabalho de pré-processamento, que reduz o número de variáveis geradas, o modelo estoura o limite de capacidade da máquina utilizada antes que se encontre a primeira solução viável, não terminando a otimização.

5.5 INCLUSÃO DOS INVESTIMENTOS EM CONSTRUÇÃO E ADEQUAÇÃO DE AERÓDROMOS E DE SEUS CUSTOS OPERACIONAIS

No modelo original, utilizado atualmente pela empresa, optou-se por não representar o investimento para abertura de novos aeródromos por ser este um valor de difícil estimação e dependente de alguns resultados do modelo.

São fatores determinantes no montante investido em um aeródromo: custos de aquisição ou arrendamento do terreno; terraplenagem, construção do terminal de passageiros, construção de pista de pousos e decolagens ou de helipontos, hangares, estacionamento de aeronaves, torre de controle, sistemas de controle de incêndio, aquisição de equipamentos, licenciamento ambiental, dentre outros.

Em caso de aeródromos operados por terceiros, que possam vir a serem utilizados pela companhia, estes investimentos necessários são, em geral, diluídos nos custos operacionais, durante o período de contrato. Desta forma, os custos operacionais costumam ser maiores quando o aeródromo é de propriedade de terceiros.

Portanto, para representar a diferença de custos entre um aeródromo já utilizado pela empresa, a contratação de um aeródromo já existente, operado por terceiros, e a construção de um novo aeródromo, são considerados na função objetivo do modelo, para minimização, os seguintes custos e investimentos:

- $I_{F_j} \rightarrow$ Montante fixo de investimento para abertura de um aeródromo. Este valor existirá apenas para áreas potenciais onde não há aeródromos atualmente ou em caso de obras de ampliação da capacidade de aeródromos atuais. A diferença de investimento necessária para construção de aeródromos com capacidades diferentes poderá ser representada através da inclusão de aeródromos na mesma localização porém, com \max_{jt} e I_{F_j} diferentes.

- C_{-O_j} → Custos operacionais por passageiro movimentado, que poderão ser diferentes em função do aeródromo. O objetivo deste custo é representar as diferenças de tarifa oferecidas por um aeródromo contratado e um próprio.

O parâmetro calculado a seguir foi acrescido ao modelo:

- **IndicaAerodromoAberto_j** → Será 1 se o somatório das variáveis y_{jt} for maior que 0 (zero), e será 0(zero), caso contrário. Ou seja, será 1 se o aeródromo abrir em algum ano.

A função objetivo tem, nesta versão do modelo, a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min} & \left[\sum_{j=1}^s \sum_{t=1}^k \sum_{m=1}^l (CF_m \times \text{Frota}_{jmt}) \right] + \left[\sum_{j=1}^s \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{t=1}^k \sum_{m=1}^l (CV_m \times k_{jwpm} \times \frac{d_{jw}}{c_m \times \text{util}_m}] \right. \\ & + \sum_{j=1}^s (I_{F_j} \times \text{IndicaAerodromoAberto}_j) + \sum_{j=1}^s (C_{-O_j} \times \sum_{w=1}^r \sum_{p=1}^g \sum_{t=1}^k \sum_{m=1}^l k_{jwpm}) + \\ & \left. \text{BigM} \times [\sum_{j=1}^s \sum_{t=1}^k y_{jt}] \right] \end{aligned}$$

O investimento necessário está profundamente ligado a questões que são resultados do modelo, como o porte do aeródromo, ou seja, a quantidade de passageiros que irá passar por seu terminal e a quantidade de vagas para aeronaves que deverá possuir. Para a inclusão na função de minimização de custos variáveis com o montante de passageiros transportados por um aeródromo o modelo se torna não linear, saindo do escopo inicial da dissertação. Como alternativa para representar as diferenças no custo total de aeródromos maiores ou menores deve-se incluir nos dados de entrada mais de um aeródromo potencial, estando na mesma coordenada, mas com custos operacionais, capacidades máximas e investimentos necessários diferentes.

5.6 INCLUSÃO DO CÁLCULO DE OCUPAÇÃO MÁXIMA DA AERONAVE DE ACORDO COM A DISTÂNCIA, RESPEITANDO SUA AUTONOMIA

O Peso Básico Operacional de uma aeronave, conforme definido na seção 2.2.4, varia conforme a quilometragem do percurso a ser realizado. De forma simplificada, quanto maior a distância a ser percorrida, maior o volume de combustível necessário e menor o peso disponível para passageiros e bagagens.

Esta redução na capacidade da aeronave é representada no modelo atual através de um percentual histórico de ocupação por tipo de modal. Entretanto, com a mudança do perfil das unidades marítimas atendidas e do perfil de frota no médio e longo prazos, a utilização do histórico de ocupação pode gerar um erro expressivo.

Com o intuito de representar estas variações na capacidade da aeronave com maior precisão, foi incluído no modelo o cálculo de capacidade de transporte do modal de acordo com a distância em que se encontra a unidade marítima a ser visitada.

Parâmetros de entrada incluídos:

- **assentos_m** → Quantidade de assentos disponíveis nas aeronaves do modal **m**.
- **cm_m** → Capacidade máxima de combustível do modal **m** em quilogramas.
- **PMD_m** → Peso máximo de decolagem do modal **m**.
- **PBO_m** → Peso Básico Operacional do modal **m**.
- **t_{extra}_m** → Tempo adicional em minutos para cada viagem decorrente de pousos, decolagens, embarque e desembarque de passageiros na plataforma e taxiamento das aeronaves no aeródromo na partida e no retorno. Substitui **t_{um}_m** e **t_{aero}_m**.

É importante ressaltar que na definição de PBO, na seção 2.2.4, estão contemplados os pesos de tripulação, equipamentos, aeronave e combustível para a missão. Este parâmetro, entretanto, representa apenas a parte fixa do PBO. O consumo de combustível será calculado pelo modelo e acrescido ao PBO posteriormente para o cálculo da capacidade.

- **Consumo_m** → Consumo médio de combustível em kg de QAV por hora voada.
- **TReserva_m** → Tempo médio de voo em minutos, para o qual o modal **m** deve possuir combustível sobressalente, seguindo as normas de segurança e considerando que os vôos seguirão as regras de voo IFR, que são mais restritivas que as regras de voo visual no que se refere a quantidade de combustível sobressalente.
- **Ppax** → Peso médio a ser considerado por passageiro, somado a sua bagagem, em quilogramas.

- **Conversao_KM_Milha** → Valor fixo, utilizado pelo modelo para conversões entre quilômetros e milhas.

Parâmetros calculados incluídos:

- **CombMissao_{jwm}** → Combustível necessário para a missão de atendimento da unidade marítima **w** a partir do aeródromo **j** utilizando o modal **m**, e retorno ao aeródromo **j**, incluindo também o combustível de reserva exigido (Ver seção 4.1).

$$CombMissao_{jwm} = Consumo_m \times \left(\left(\frac{d_{jw}}{Conversao_{KM Milha}} \right) + \frac{t_{extra_m} + TReserva_m}{60} \right)$$

- **PermiteFluxoAutonomiaTanque_{jwm}** → Será 1 desde que todas as condições a seguir forem atendidas: o parâmetro **PermiteModalUM_{wm}** for igual a 1; **cm_m** for maior que **CombMissao_{jwm}**; excluindo-se do **PMD_m**, o **PBO_m** e o combustível necessário para a missão ainda haja capacidade disponível para transporte de passageiros pelo menos 1 passageiro (**PMD_m - PBO_m - CombMissao_{jwm} - Ppax** >= 0).
- **FolgaPeso_{jwm}** → Este parâmetro será calculado apenas quando **PermiteFluxoAutonomiaTanque_{jwm}** for igual a 1. Seguirá a equação lógica abaixo:

$$FolgaPeso_{jwm} = PMD_m - PBO_m - CombMissao_{jwm}$$

Parâmetros alterados:

- **cm** → A capacidade por modal, que na versão anterior era um dado de entrada do modelo tornou-se um parâmetro calculado, dependente do modal, aeródromo e unidade marítima (**c_{jwm}**). Este parâmetro será calculado apenas quando **PermiteFluxoAutonomiaTanque_{jwm}** for igual a 1. Esta medida reduz o número de parâmetros e variáveis gerados, deixando o modelo mais enxuto e rápido. Seu valor é obtido a partir da seguinte equação lógica:

Se (**FolgaPeso_{jwm} / Ppax < assentos_m**), então **c_{jwm}** corresponderá ao maior valor inteiro menor ou igual a divisão de **FolgaPeso_{jwm}** por **Ppax**. Caso contrário, (**c_{jwm} = assentos_m**).¹⁰

¹⁰ Esta expressão lógica é necessária pois nem sempre a capacidade máxima em peso da aeronave corresponde exatamente ao número de assentos disponíveis. Sendo assim, mesmo que o modal possua

- **PermiteFluxo_{jwptm}** → Nesta versão do modelo, este parâmetro estará condicionado as seguintes afirmações para que seja igual a 1: existe demanda **q_{wpt}**; existe capacidade no aeródromo *j* e ano *t* (**max_{jt}**); o parâmetro **PermiteModalUM_{wn}** é igual a 1; e **PermiteFluxoAutonomiaTanque_{jwm}** é igual a 1.

Como a partir destes parâmetros calculados, restringe-se o atendimento às distâncias para as quais a aeronave possua autonomia, o parâmetro de entrada **aut_m** e a restrição **Autonomia_{jwptm}** se tornam desnecessários. Não faz mais sentido também a utilização do parâmetro **util_m** como a ocupação histórica, para representar casos em que devido à distância da unidade marítima, a aeronave não seja capaz de realizar a missão com todos os assentos ocupados. Entretanto, este parâmetro continuará sendo utilizado para representar possíveis ineficiências devido à falta de passageiros ou ajuste da demanda à capacidade da frota.

folga em peso, não poderá transportar passageiros além do número máximo de assentos disponibilizados na configuração utilizada da aeronave.

6. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso de atendimento à movimentação de passageiros para trabalho em bacias petrolíferas marítimas da Petrobras na região Sul-Sudeste da costa brasileira. O objetivo deste estudo de caso é de validação do modelo aperfeiçoado de localização de aeródromos e quantificação das melhorias obtidas com a revisão do modelo.

6.1 CASO LOGÍSTICO

O processo decisório sobre o transporte de passageiros para trabalho em bacias petrolíferas marítimas ocorre atualmente como representado na Figura 13.

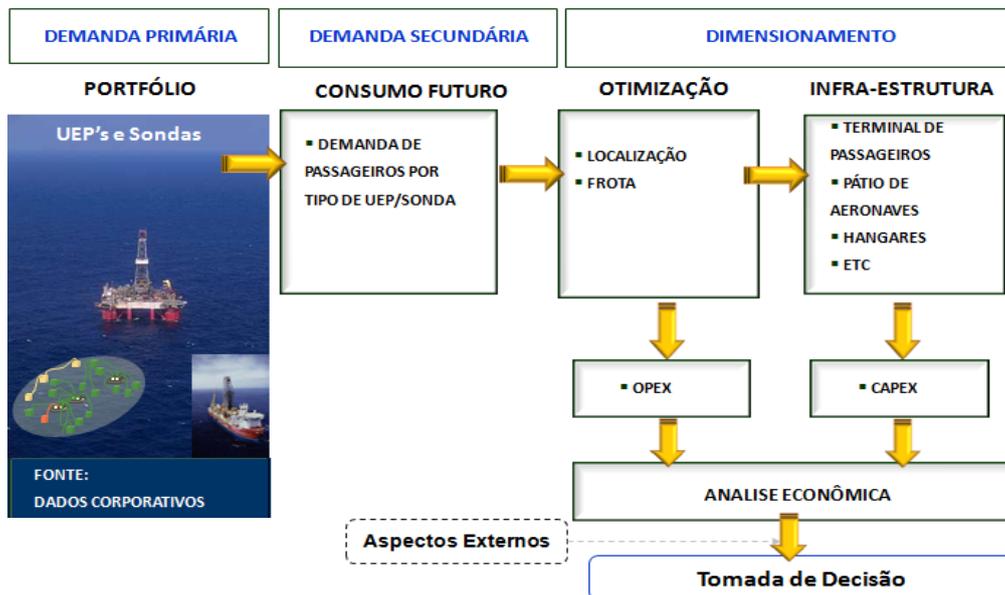


Figura 13: Metodologia de Planejamento de Rede Logística (Adaptado de SENA *et. al.* 2010)

É importante ressaltar que os aspectos quantitativos não são os únicos considerados no processo de tomada de decisão. Questões qualitativas, representadas na Figura 13 como aspectos externos, também são levadas em conta pelos decisores. Dentre os aspectos qualitativos encontra-se a avaliação ambiental, de extrema

relevância para a localização de aeródromos já que o licenciamento ambiental pode atrasar ou mesmo inviabilizar um projeto. Além disto, são analisados: facilidade de acesso ao local, características do solo, comportamento climático e carta aeronáutica do local, dentre outros.

Apesar da relevância das questões qualitativas, as respostas do modelo quantitativo auxiliam na escolha entre as alternativas aprovadas qualitativamente, na definição do porte que cada aeródromo deve possuir e na configuração da rede de atendimento, além de mostrar aos gestores qual o impacto em custos que diferentes alternativas podem gerar.

O escopo deste estudo de caso se resume à análise quantitativa dos resultados e, mais especificamente, à análise do desempenho da ferramenta de apoio a decisão desenvolvida.

6.1.1 Demanda

A demanda primária corresponde à quantidade de unidades marítimas (UMs), por tipo, que estarão operando em cada mês do ano, ou seja, UMs em operação no mês anterior + UMs novas - UMs que saem de operação. A demanda secundária, dado de entrada do modelo de otimização, corresponde à quantidade de passageiros por plataforma e por tipo de voo, calculada a partir do histórico por tipo de passageiro e UM, multiplicado pela projeção de entrada em operação de UMs nos próximos 20 anos.

Para este estudo de caso, será considerada uma demanda fictícia. Essa demanda foi baseada na projeção de crescimento de produção de óleo e gás natural da Petrobras, divulgada no Plano de Negócios 2010-2014 (Figura 14) e no histórico de movimentação de 2010.

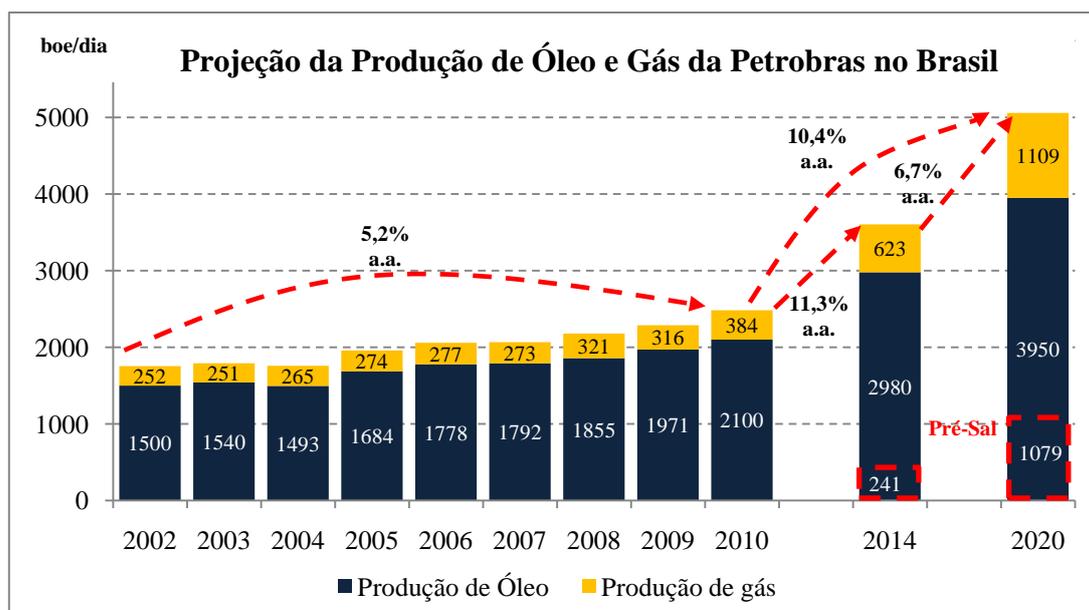


Figura 14: Metas de produção de óleo e gás natural 2010-2020 (GABRIELLI e BARBASSA, 2011)

Os dados de entrada do modelo são detalhados por ponto de demanda, tipo de passageiro e ano. O crescimento médio anual do número de passageiros movimentados foi de 8% entre 2011 e 2020. A partir deste ano considerou-se demanda constante, mudando apenas a locação de algumas demandas, para representar as movimentações de sonda ao fim de cada poço perfurado. Este crescimento é sensivelmente menor que o apresentado no Plano de Negócios da empresa, pois se supôs que haverá redução do número de funcionários a bordo ao longo dos anos devido ao desenvolvimento tecnológico.

Outra informação relevante sobre a demanda é sua localização geográfica. Em linha com a informação do Plano de Negócios 2010-2014, o crescimento se concentra principalmente da Bacia de Santos na região do Pré-Sal. A participação desta bacia nos volumes totais movimentados triplica ao longo dos primeiros 10 anos de análise (Figura 15).

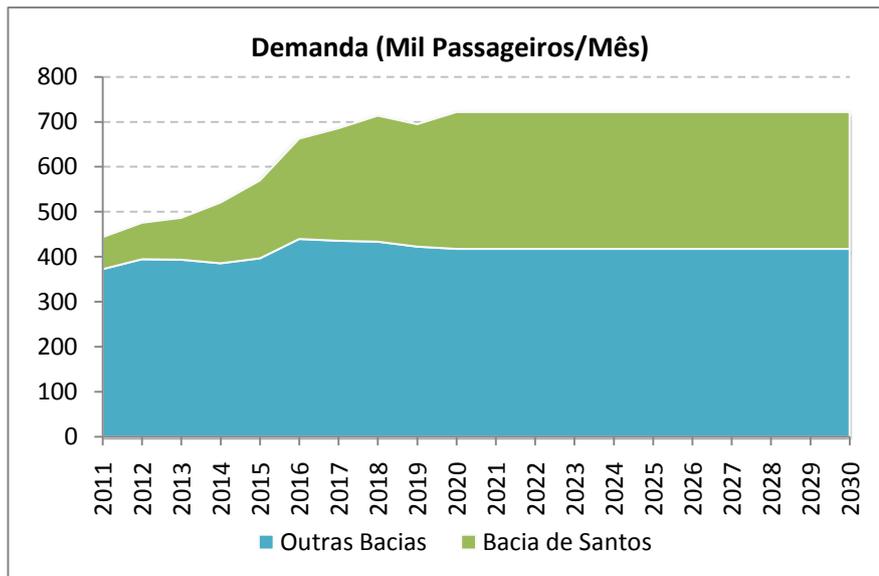


Figura 15: Estimativa de demanda de passageiros utilizada no estudo de caso. (Fonte: Valores arbitrados para teste do modelo não representando a demanda real)

Foram considerados no total 1098 pontos de demanda (w). As unidades de produção, que são instaladas e se mantêm numa mesma localização apresentam sempre o mesmo índice w . Entretanto, as sondas, que se movimentam para a locação de cada poço em que realizam alguma atividade, apresentam um novo valor w para cada alocação, o que eleva o número de variáveis e a complexidade da resolução do modelo. Todas as localizações consideradas também foram arbitradas, não tendo relação com os dados reais da Petrobras.

6.1.2 Aeródromos

Os aeródromos considerados neste estudo de caso serão os operados atualmente pela Petrobras, acrescidos de alguns pontos intermediários, na costa brasileira, totalizando quatorze localidades analisadas. Buscou-se localizar estes pontos onde se observou uma maior região descoberta na parte da costa brasileira em que se encontram as Bacias do Espírito Santo, Campos e Santos. Foram incluídos: um ponto acima de Vitória, um entre Vitória e São Tomé, dois pontos entre Jacarepaguá e Itanhaém, dois ponto entre Itanhaém e Navegantes e 1 ponto após Navegantes, como se pode visualizar no mapa da Figura 16. Estes pontos foram definidos aleatoriamente para este estudo de caso, não representando alternativas reais para as quais são necessários: mapeamento de áreas disponíveis e análises qualitativas.



Figura 16: Mapa ilustrativo dos aeródromos em operação e dos pontos considerados como potenciais para novas bases aeroportuárias no estudo de caso.

6.1.3 Helicópteros

Foram selecionados para este estudo de caso, dois modelos de aeronave de asa móvel, dentre os mais modernos contidos na frota atual em operação para a Petrobras, sendo uma de médio e outra de grande porte.

A autonomia considerada para estas aeronaves foi calculada considerando-se que os vôos levarão à fração inteira da quantidade de assentos disponíveis multiplicada pela utilização das aeronaves. Considera-se também que o peso médio de cada passageiro acompanhado de sua bagagem será de 107 kg.

A seguir, serão apresentados em detalhes os modelos de aeronave utilizados e os parâmetros relacionados. São eles:

a) AW 139 :

Esta aeronave de médio porte biturbina é produzida pela AgustaWestland. De acordo com o fabricante, esta aeronave é apropriada para o transporte *offshore*. Possui cabine com capacidade para 12 a 15 passageiros. A configuração deste

helicóptero utilizada para a Petrobras, que segue os padrões internos de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS), possui 12 assentos de passageiros.



Figura 17: Aeronave AW 139 da empresa AgustaWestland

A velocidade de cruzeiro máxima desta aeronave é de 306 km/h. Na Tabela 3, pode-se visualizar os parâmetros considerados nos cenários deste estudo de caso.

b) EC225

A EC225 é uma aeronave de grande porte do fabricante Eurocopter. Na configuração utilizada pela Petrobras, seguindo as normas de Segurança, Meio Ambiente e Saúde vigentes na empresa, esta aeronave apresenta 18 assentos de passageiros. O modelo, entretanto, pode levar até 25 passageiros e dois pilotos, de acordo com o fabricante.



Figura 18: Aeronave EC225 da empresa Eurocopter

Esta aeronave de asa móvel apresenta velocidade de cruzeiro máxima de 324 km/h quando em peso máximo, que é de 11.000 kg.

Tabela 3: Parâmetros considerados para as aeronaves AW 139 e EC 225

Parâmetro	AW 139	EC 225
util (%)	75%	90%
v (ktas) ¹¹	152	140
aut (km) ¹²	584	812
CF (R\$/ano) ¹³	5.464.740	9.061.344
CV (R\$/km) ¹⁴	21,24	31,22
h (h/mês)	120	120
t_um (h)	0,13	0,15
t_aero (h)	0,24	0,25
t_extra(min)	23	28
c/Assentos(un)	12	18
cm(kg) ¹⁵	1254	2742
PMD(kg)	6800	10520
PBO(kg)	4595	6997
Consumo(kg/h)	528	797
TReserva(min)	30	45

As aeronaves de grande porte, que há poucos anos atrás apresentavam custos muito mais elevados que as de médio porte, atualmente, vêm se tornando financeiramente competitivas. Estas aeronaves apresentam, em geral, maior autonomia, possibilitando vôos para unidades mais distantes da costa, como as localizadas no Pólo Pré-Sal da Bacia de Santos. Outra importante vantagem das aeronaves de grande porte é relativa à gestão de transportes e capacidade dos aeródromos, pois sua utilização proporciona um transporte de mais passageiros com menos vôos e desta forma, são necessários menos helicópteros e vagas de estacionamento nos aeródromos, além de facilitar o processo de gerenciamento do tráfego aéreo.

¹¹ A velocidade de cruzeiro considerada é inferior à real, pois dilui-se nesta a velocidade inferior que é praticada nos momentos de pouso e decolagem.

¹² A autonomia considera todas as regras relativas a combustível de reserva e a utilização de tanque extra. A distância considerada é a de toda a viagem (aeródromo – unidade marítima – aeródromo).

^{13/13} Os custos fixo e variável das aeronaves são valores fictícios, apenas para teste e validação do modelo desenvolvido.

¹⁴ A capacidade do tanque de combustível calculada para os modais dos cenários avaliados não considerou a utilização de tanque extra já que é possível atender a todos os pontos de demanda sem sua utilização. As aeronaves que possuem tanque extra representam um pequeno percentual da frota atual, que será desprezado para planejamento de longo prazo.

6.2 AMBIENTE COMPUTACIONAL

Este estudo de caso é realizado utilizando-se computador com as seguintes configurações: processador Intel Core™2 Duo CPU E6750 @ 2,66 GHz, 7,93 GB de memória RAM, e sistema operacional Microsoft Windows Server 2003 R2 Enterprise x 64 Edition Service Pack 2.

Conforme informado na seção 4.3, o software utilizado foi o Aimms 3.11. O AIMMS possui interface com diversos solvers¹⁶, sendo o IBM ILOG CPLEX, na versão 12.1 e o GUROBI 2.0, os solvers testados para o problema em questão.

O CPLEX apresenta um conjunto de algoritmos poderosos de otimização para produzir decisões lógicas e precisas. O algoritmo de *branch and bound* presente no solver utiliza técnicas modernas de planos de corte e heurísticas de forma a possibilitar a resolução de problemas com número elevado de variáveis em tempo computacional adequado. Além disto, o solver, acessado através do software AIMMS é facilmente configurado para a utilização das diversas possibilidades de estratégia de busca do método *branch and bound*, técnicas de geração de cortes, heurísticas auxiliares, opções de pré-processamento etc.

O solver GUROBI, desenvolvido mais recentemente, assim como o CPLEX, apresenta diversas funcionalidades de pré-processamento, heurísticas auxiliares e outras técnicas para agilizar o processamento que possibilitam a manutenção do número de decisões em um nível razoável (KOPANOS *et. al.*, 2010). MITTELMANN (2011) realizou estudos de benchmarking entre solvers para problemas de programação inteira mista. O GUROBI apresentou vantagens em relação ao CPLEX tanto no tempo para obtenção da solução ótima (otimalidade) quanto na quantidade de problemas para o qual obteve solução viável (viabilidade), em tempo de processamento limitado a 2 horas, conforme Figura 19.

A aceitação do modelo revisado pelos usuários será bastante sensível ao tempo de processamento do modelo novo. Portanto, a manutenção do tempo de processamento próximo ao do modelo básico contribuirá para a aceitação do modelo aperfeiçoado pelos usuários finais. Levando em conta os resultados dos estudos de *benchmark* de MITTELMAN que indicam para um grupo de problemas de programação inteira mista

¹⁶ Solver é um solucionador de programações matemáticas de alto desempenho.

que o solver GUROBI apresentou melhor desempenho que o CPLEX, adotou-se o GUROBI para a execução dos cenários analisados no estudo de caso.

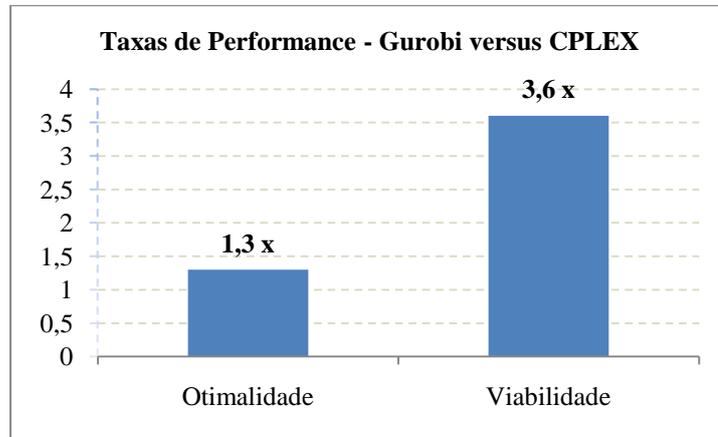


Figura 19: Taxas de desempenho do solver GUROBI versus CPLEX na resolução de MIPs de acordo com estudo de benchmark de solvers (Adaptado de MITTELMANN, 2011)

A utilização deste conjunto de softwares, AIMMS e GUROBI, facilita a construção do modelo, sua utilização pelos usuários finais e a alteração das configurações do solver de acordo com a instância do problema a ser otimizada, pelo próprio usuário final, de forma que os resultados sejam obtidos com maior rapidez e o modelo revisado tenha alta aceitação pela empresa.

Foram testadas algumas configurações internas da ferramenta sendo adotadas as configurações *default* do software, exceto para a tolerância relativa à otimalidade (*MIP Relative Optimality Tolerance*). Este parâmetro, cujo valor *default* é 10^{-13} , foi testado também com o valor 0,03. Isto significa que, se em 100 iterações consecutivas a diferença percentual encontrado entre a melhor solução inteira e o melhor limitante inferior, proveniente de relaxação linear, for menor ou igual a 3%, o modelo será interrompido e a solução considerada ótima.

6.3 CENÁRIOS

Os conjuntos de cenários analisados têm como principais características os números presentes na Tabela 4, que mostram as dimensões do problema.

Tabela 4: Dimensões dos cenários rodados

Item	Valor
Variáveis	2.324.241
Variáveis Inteiras	1.162.540
Aeródromos	14
Modais	2
Horizonte de Planejamento (anos)	20
Unidades Marítimas	1098

Para testar a eficiência do modelo e entender sua resposta a mudanças na demanda serão testados seis conjuntos de cenários, descritos nas subseções a seguir. Deseja-se com estes cenários comprovar tanto a coerência dos resultados gerados como a convergência do modelo para um resultado ótimo em tempo computacional aceitável para diferentes instâncias.

Para cada conjunto de cenários foram realizadas quatro rodadas descritas a seguir:

- a) Parâmetros *default* do AIMMS e função objetivo com penalização pela abertura de aeródromos.
- b) Parâmetros *default* do AIMMS e função objetivo sem penalização.
- c) *MIP Relative Optimality Tolerance*¹⁷ = 0,03, demais parâmetros do AIMMS *default* e com penalização da função objetivo pela abertura de aeródromos.
- d) *MIP Relative Optimality Tolerance* = 0,03, demais parâmetros do AIMMS *default* e função objetivo sem penalização.

6.3.1 Cenário livre e sem custos

Neste conjunto de cenários, todos os aeródromos têm suas capacidades máximas de passageiros e vagas infinitas e capacidades mínimas zeradas de forma que possam ser abertos para atender a qualquer volume de demanda que seja competitivo movimentar por ele.

Adicionalmente, todos os custos e investimentos relativos a aeródromos foram anulados.

¹⁷ O valor default do AIMMS 3.11 para *MIP Relative Optimality Tolerance* é de 10^{-13} .

O objetivo destas rodadas é de verificação da configuração ideal de atendimento caso não houvesse diferenças de custo nem limites de capacidade dos aeródromos. Eles possibilitam identificar o potencial de utilização de cada aeródromo relativo apenas a sua localização em relação à demanda

A comparação dos resultados deste cenário com os demais irá mostrar quanto os custos e limites de capacidade influenciam nos resultados.

6.3.2 Capacitado e sem custos

Este conjunto de cenários diferencia-se do anterior (Seção 6.3.1) por apresentar limites de passageiros transportados e vagas para aeronaves para alguns aeródromos. Estes limites representam as restrições de capacidade dos aeródromos existentes e de espaço para construção no caso das alternativas de construção de novos aeródromos. Os valores contidos neste estudo de caso foram arbitrados, não representando as capacidades reais.

Sua comparação com o conjunto de cenários anterior possibilita identificar o quanto as limitações de capacidade elevam os custos de operação. Diferenças de custos muito grandes entre estes grupos de cenários devem motivar estudos sobre a possibilidade da expansão dos aeródromos que mais atraem demanda.

6.3.3 Livre e com custos;

Este conjunto de cenários diferencia-se do primeiro grupo (Seção 6.3.1) por apresentar custos de instalação para os aeródromos existentes e não utilizados pela empresa ou para os não existentes e também custos de operação diferenciados por tipo de aeródromos.

Todos os valores utilizados foram arbitrados para este estudo de caso tendo como critério que aeródromos próprios devem possuir custo de operação por passageiro menor que os contratados. Em contrapartida, no caso de construção de novos aeródromos, os investimentos serão consideravelmente maiores que aqueles necessários para se adequar um aeródromo já existente para utilização.

A comparação deste com o primeiro grupo possibilita analisar a influência dos custos de instalação e operação na configuração da rede logística e o impacto destes custos e investimentos no custo de operação total.

6.3.4 Capacitado e com custos;

Este é o conjunto de cenários completo, com demanda integral, aeródromos com restrições de capacidade ativas, investimentos na abertura de aeródromos e seus custos de operação considerados.

6.3.5 Capacitado, com custos e com demanda aumentada em 25%

Este conjunto de cenários diferencia-se do anterior por ter sua demanda por movimentação de passageiros aumentada em 25% (uniformemente entre as unidades).

O objetivo destas rodadas é verificar a sensibilidade dos resultados (aeródromos abertos e custo de operação) ao aumento da demanda.

Cenários de aumento da demanda também são interessantes para analisar a robustez da solução encontrada, ou seja, até que volume de demanda a solução adotada poderia atender sem ultrapassar os limites de capacidade dos aeroportos.

6.3.6 Capacitado, com custos e com demanda reduzida em 25%

Este conjunto de cenários tem, assim como o anterior, o objetivo de verificar a sensibilidade dos resultados (aeródromos abertos e custo de operação) a variações na demanda. Neste caso, a variação é para baixo. A demanda de passageiros é reduzida em 25%, também de forma uniforme entre as unidades marítimas, ou seja, não foram retiradas unidade marítimas demandantes, mas o volume de passageiros por unidade foi reduzido.

6.4 RESULTADOS

Os principais números dos resultados obtidos nas rodadas do modelo estão resumidos na Tabela 5. Como se pode observar, apesar de um aumento considerável na complexidade do modelo, resultados satisfatórios foram obtidos em todas as rodadas com tempo de processamento menor que 2 horas. Este tempo é aceitável para o horizonte de planejamento de 20 anos. Mesmo se considerado que o planejamento é revisto anualmente, o aumento no tempo de processamento não causa impacto significativo.

Tabela 5: Resumo dos Resultados Computacionais

Cenário	Rodada	Gap % ¹⁸	Iterações	Tempo Processamento (h)	Custo Total	Penalização	Custo Real
1	a	1,35	215.861	1,34	18.449.064.385	1.728.723.684	16.720.340.701
	b	0,94	181.624	1,12	16.478.306.850	-	16.478.306.850
	c	2,91	143.119	0,13	18.741.637.600	2.098.221.876	16.643.415.724
	d	2,67	73.248	0,01	16.724.543.800	-	16.724.543.800
2	a	1,75	556.543	0,97	20.645.234.769	2.652.469.164	17.992.765.605
	b	1,14	212.898	0,73	17.683.453.594	-	17.683.453.594
	c	2,37	234.154	0,14	20.776.007.390	2.692.058.256	18.083.949.134
	d	2,56	102.317	0,05	17.938.222.362	-	17.938.222.362
3	a	1,72	164.477	0,22	18.927.012.140	1.728.723.684	17.198.288.456
	b	1	205.320	1,25	16.937.135.336	-	16.937.135.336
	c	2,68	139.940	0,16	19.086.563.085	1.768.312.776	17.318.250.309
	d	2,97	73.145	0,05	17.232.450.827	-	17.232.450.827
4	a	2,36	522.598	1,42	21.362.129.103	2.718.450.984	18.643.678.119
	b	1,68	196.236	1,89	18.441.895.037	-	18.441.895.037
	c	2,75	226.967	0,09	21.447.647.899	2.692.058.256	18.755.589.643
	d	2,39	105.411	0,18	18.501.620.055	-	18.501.620.055
5	a	1,66	326.024	1,58	27.908.367.881	3.397.710.646	24.510.657.235
	b	1,84	251.128	0,59	24.240.130.724	-	24.240.130.724
	c	2,54	136.846	0,02	28.109.830.859	3.744.079.207	24.365.751.652
	d	2,18	136.485	0,08	24.325.350.252	-	24.325.350.252
6	a	2,46	527.494	1,51	15.555.090.134	1.653.130.829	13.901.959.305
	b	1,73	316.513	1,67	13.533.337.093	-	13.533.337.093
	c	2,83	546.616	1,65	15.641.466.990	1.653.130.829	13.988.336.161
	d	2,06	177.205	0,44	13.605.388.360	-	13.605.388.360

Em todos os conjuntos de cenários, as rodadas a e b foram finalizadas por falta de memória. Entretanto, todas obtiveram uma solução viável de boa qualidade, com diferença % em relação ao limitante inferior de relaxação linear de no máximo 2,62%.

¹⁸ Diferença percentual entre a melhor solução inteira encontrada e o limitante inferior proveniente de relaxação encontrado pelo solver.

Posteriormente, foram alteradas as configurações do software para uma tolerância relativa de 3%. Com esta configuração foram realizadas as rodadas c e d de cada grupo de cenários sem problemas de falta de memória do software.

A penalização da função objetivo pela abertura de um aeródromo é um item do modelo básico que foi inclusa com o objetivo de evitar a abertura de um número excessivo de aeródromos. Este controle é necessário porque o modelo básico não considera o investimento em construção/adequação dos aeródromos. Portanto, a tendência é abrir muitos aeródromos atendendo a poucos passageiros.

O modelo aperfeiçoado considera o investimento nos aeródromos. Portanto, a utilização da penalização perde parte de sua utilidade. Para analisar o impacto desta penalização nos resultados, foram feitas rodadas com e sem penalização, sendo as de letra b e d, de cada cenário, as que não apresentam penalização da função objetivo. Como se pode observar na Tabela 6 a penalização reduz consideravelmente o número de aeródromos (até 43%). Entretanto, a diferença no montante total gasto (custos + investimentos) é percentualmente pouco significativa (até 3%). Caso todos os custos, diretos e indiretos, com a operação de transporte de pessoas estejam considerados no modelo, não é necessário utilizar a penalização. Entretanto, custos de difícil mensuração como o gerenciamento de contratos e mão de obra podem não estar contemplados no modelo. Neste caso, as rodadas com e sem penalização são válidas e podem servir de embasamento para as decisões gerenciais.

Tabela 6: Comparativo de rodadas com e sem penalização da função objetivo.

Cenário	Quantidade de Aeródromos ¹⁹			Custo Total + Investimento		
	a	b	% Dif	a	b	% Dif
1	7	10	43%	16.720.340.701	16.478.306.850	-1%
2	12	13	8%	18.125.055.777	17.683.453.594	-2%
3	7	10	43%	17.198.288.456	16.937.135.336	-2%
4	11	12	9%	18.643.678.119	18.441.895.037	-1%
5	11	14	27%	24.510.657.235	24.240.130.724	-1%
6	10	12	20%	13.901.959.305	13.533.337.090	-3%

Nos cenários sem restrição de custos e capacidade, cada unidade marítima é atendida pelo aeródromo mais próximo, que representará menor distância percorrida e

¹⁹ Este número representa o total de aeródromos que esteve durante algum período aberto, não representando necessariamente que estejam operando durante todo o período de análise. Algumas localidades potenciais para aeródromos foram considerados com capacidade nula nos primeiros anos de análise já que precisariam ser construídas ou adequadas, não estando imediatamente disponíveis.

conseqüentemente menor custo. Neste estudo de caso, os cenários livres apresentaram as menores quantidades de aeródromos abertos. A explicação para este resultado é que as unidades marítimas estão geograficamente distribuídas em *clusters*, onde se encontram as reservas de petróleo, e não distribuídas de forma equilibrada ao longo da costa do sul e sudeste. Portanto, dos 14 pontos potenciais para localização de aeródromos, apenas 10 se encontram mais próximos de pelo menos uma das unidades marítimas. Os demais poderão ser utilizados devido a custos operacionais ou investimentos mais competitivos ou a restrições de capacidade.

A Tabela 7 apresenta o comparativo de custos médios entre os grupos de cenários. Por ser menos restritivo, o grupo de cenários 1 apresentou os menores custos totais. O grupo de cenários 2 foi em média 8% mais caro que o 1 representando o incremento nos custos devido a limitações de capacidade de alguns aeródromos. O grupo três foi 3% mais caro que o 1, demonstrando que, ao menos neste estudo de caso, os resultados são mais sensíveis aos limites de capacidade que aos custos operacionais dos aeródromos e investimentos em construção e adequação. O grupo de cenários 4, que representa o cenário base, com todas as restrições, é em média 12% mais caro que o cenário sem as restrições.

Tabela 7: Comparativo de custos médios dos grupos de cenários em relação ao cenário 1.

Cenário	% Dif Médio versus Cenário 1
2	8%
3	3%
4	12%
5	46%
6	-17%

A sensibilidade dos resultados às variações na demanda pode ser observada na Tabela 8, onde se compara os custos médios do grupo de cenários 4 aos grupos 5 e 6 onde a demanda é perturbada em 25% para cima e para baixo respectivamente.

Tabela 8: Análise de sensibilidade de custos dos cenários a variações na demanda

Cenário	% Dif Médio versus Cenário 4
5	31%
6	-26%

Pode-se concluir que na instância deste estudo de caso, a perturbação de 25% para cima é mais impactante do que a redução da demanda. Esta diferença deve-se à necessidade de investimento em novos aeródromos no cenário de aumento de demanda. No grupo de cenários 5, com demanda expandida, o total de aeródromos varia de 11 a 14, sendo que varia de 11 a 12 no grupo de cenários 4 e de 10 a 12 no grupo de cenários 6.

Em todos os cenários analisados, houve um crescimento gradativo da utilização dos helicópteros de grande porte, conforme ocorreu o crescimento da demanda nos blocos exploratórios mais distantes da costa. Nos cenários rodados, o percentual de grande porte na frota variou de 8 a 19%.

Para este estudo de caso, o helicóptero de grande porte teve como parâmetros de entrada arbitrados, custo fixo 66% maior que o do médio porte e custo variável 47% maior. Este modal leva, em sua ocupação máxima, 50% mais passageiros que o médio porte. Esta relação custo-benefício, entretanto, varia ponto a ponto de acordo com a alteração nas capacidades dos modais.

Cabe ressaltar que os custos, o volume demandado e a localização das unidades marítimas demandantes presentes na instância deste estudo de caso também são fictícios. Logo, o percentual ideal de grande porte na frota pode ser maior ou menor no cenário real, dependendo da localização da demanda e da relação custo/benefício dos modais. No modelo básico, era estabelecido como parâmetro de entrada uma ocupação média da frota por tipo de modal proveniente do histórico. Este parâmetro poderia ocasionar um erro de dimensionamento com a mudança na distribuição da demanda, que se distanciará da costa ao longo do horizonte de planejamento e reduzirá a ocupação da frota gradativamente, conforme se pode observar na Figura 20. Esta figura apresenta para o cenário 4, rodada b, a evolução até o ano de 2020 (em que se atinge o pico de demanda) do número médio por helicóptero de vagas disponibilizadas em vôos dentro de um ano.



Figura 20: Evolução do número médio de passageiros por aeronave até 2020 para a rodada b do cenário 4.

Na Figura 21 pode-se visualizar a projeção de frota para o Cenário 4B. Pode-se observar um pequeno acréscimo percentual de EC225, aeronave de grande porte, na frota ao longo do horizonte de planejamento analisado. Entretanto, como demonstrado na Figura 20, a utilização das aeronaves não aumentou. Isto é explicado pelo crescimento da demanda na Bacia de Santos, caracterizada por apresentar campos petrolíferos e blocos exploratórios mais distantes da costa que os encontrados na Bacia de Campos e Espírito Santo. Conseqüentemente, para atendimento a esta demanda, haverá um aumento das distâncias percorridas pelas aeronaves que também farão menos vôos por dia e levarão menos passageiros por vôo.

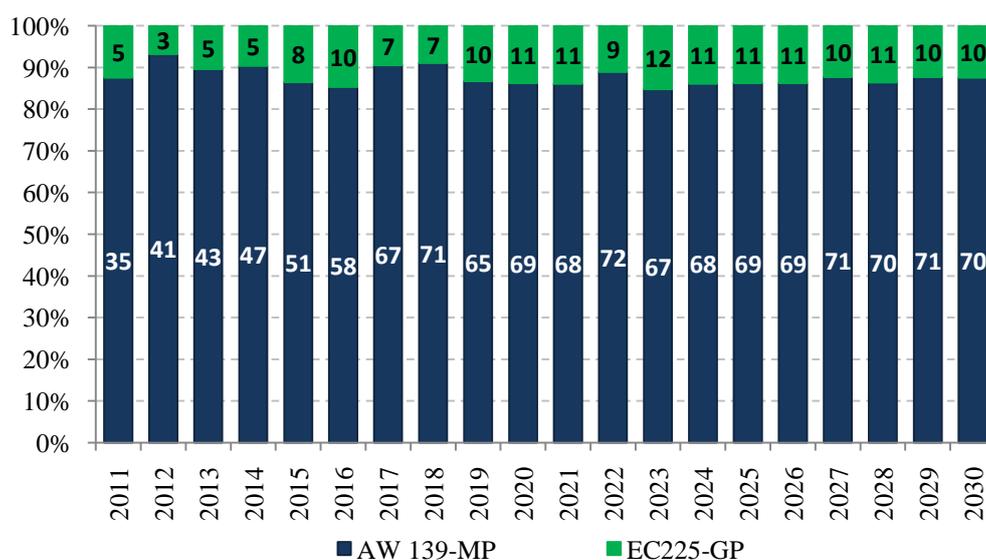


Figura 21: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4B

Na Figura 22 pode-se visualizar a mudança na distribuição da demanda entre os aeroportos, para o cenário 4B. Nos primeiros 3 anos, em torno de 80% da demanda é atendida pelos 5 aeródromos mais ao Norte (Arbitrado 1, Vitória, Arbitrado 2, São Tomé e Macaé). Conforme aumenta a demanda ao sul, esta proporção se reduz, estabilizando-se em pouco mais de 50%. O aeroporto de Cabo Frio eleva consideravelmente seu percentual de atendimento, ficando em torno de 20%. Os aeroportos arbitrados 3 e 4, que no modelo só foram liberados para utilização após 2017, representando áreas potenciais que necessitassem de construção de infraestrutura, virão a absorver juntos em torno de 10% do atendimento.

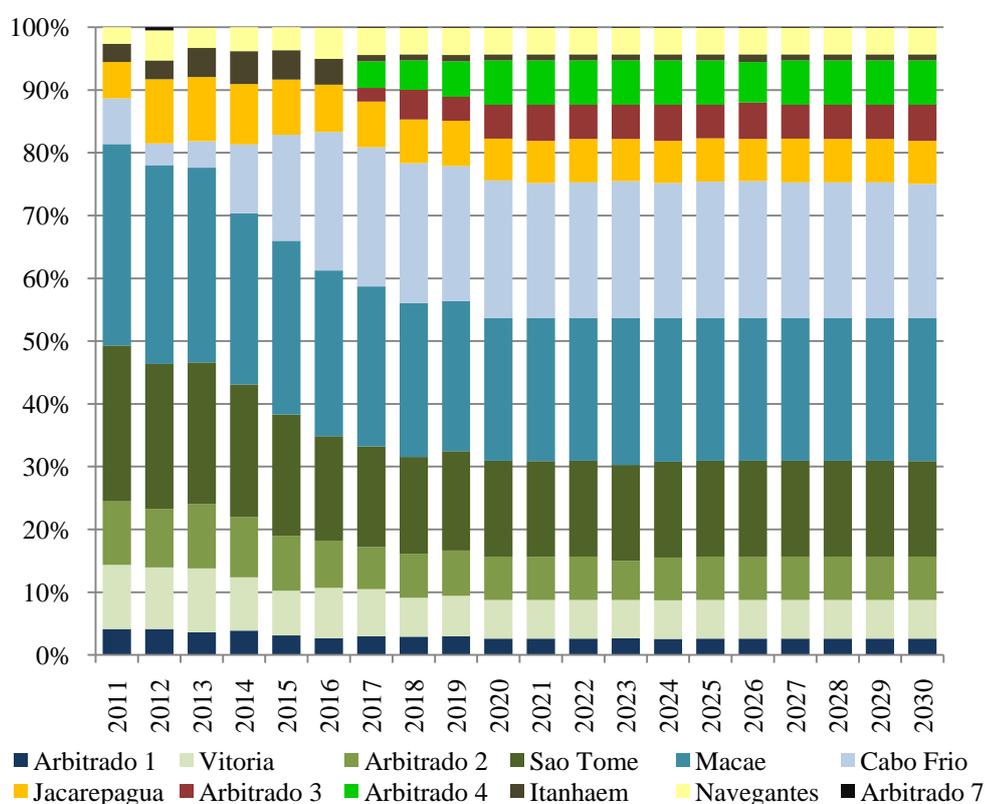


Figura 22: Distribuição dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4B

Na Figura 23 pode-se visualizar as regiões de atendimento dos aeródromos ao longo do horizonte de planejamento analisado, também para o cenário 4B. A mudança mais significativa ocorreu em 2017, quando o modelo passou a alocar passageiros aos locais Arbitrado 3 e 4. Outra alteração significativa ocorreu em 2020, em que a demanda atinge seu máximo, passando-se a alocar um volume maior ao local Arbitrado 3. Pode-se observar nos mapas que nem sempre a demanda é atendida pelo aeródromo

mais próximo, como ocorre para alguns pontos mais próximos de Jacarepaguá que foram alocados a Arbitrado 3. Isto ocorre devido aos limites de capacidade de alguns aeródromos colocados no modelo.

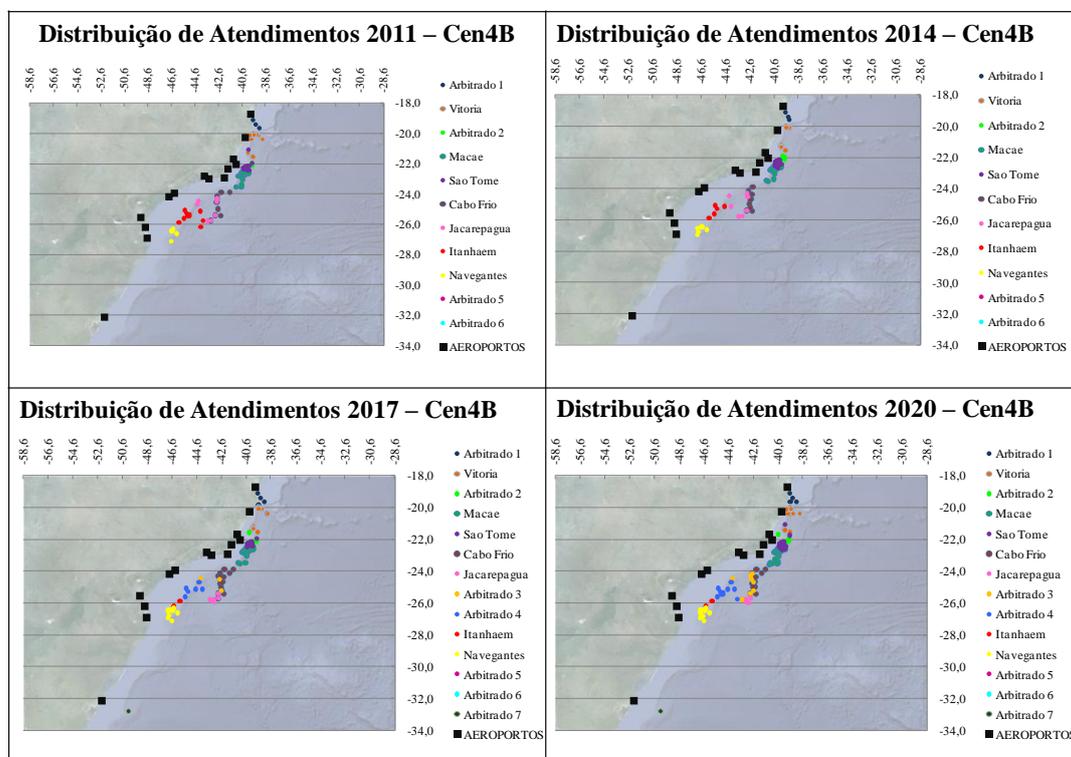


Figura 23: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4B²⁰

Pode-se observar também, que o aeródromo de Jacarepaguá a partir de 2017 está atendendo a unidades mais distantes da costa enquanto outras mais próximas a este aeródromo são atendidas por outros locais. Isto ocorre pois este aeródromo encontra-se bem localizado para atendimento às unidades mais distantes da costa, para as quais a mudança de aeródromo pode significar a redução da capacidade de transporte devido a maior necessidade de combustível. Este tipo de decisão não ocorreria no modelo básico, que considera apenas a quilometragem máxima que o helicóptero e uma ocupação média para todos os vôos realizados.

Os gráficos e mapas incluídos nesta seção para o cenário 4B podem ser visualizados nos anexos para todos os cenários apresentados neste estudo de caso.

²⁰ Mapas ilustrativos da alocação de demandas aos aeródromos feitos em Excel podendo apresentar pequenos erros de escala.

Os resultados obtidos, mostrados acima, indicam que as revisões no modelo trouxeram benefícios significativos à qualidade das soluções, mantendo os tempos de processamento aceitáveis.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As descobertas de petróleo dos últimos anos apontam para um grande crescimento da exploração e produção de petróleo no Brasil. Conseqüentemente, haverá aumento da demanda por movimentação de passageiros e da complexidade deste transporte devido ao aumento da distância média entre os campos e a costa brasileira.

Nesta dissertação, com base em uma ferramenta utilizada atualmente pela Petrobras, nas deficiências que apresenta e na revisão da bibliografia sobre o assunto, foi desenvolvido um modelo de otimização de rede logística. Este modelo apresenta grande potencial de utilização pela Petrobras como ferramenta de apoio à decisão para planejamento de rede logística de movimentação de seus funcionários para trabalho *offshore*.

Esta dissertação também representa contribuição acadêmica relevante, já que na pesquisa bibliográfica realizada não foram encontradas referências sobre modelos para planejamento estratégico de rede logística aplicados a transporte aéreo de passageiros para atividade *offshore*.

No trabalho foram descritas uma a uma as revisões realizadas no modelo e a sua importância, e também foi analisada a consistência do modelo revisado através de um estudo de caso de atendimento à demanda das bacias petrolíferas marítimas do Sul e Sudeste brasileiros. Os resultados apresentados foram positivos, destacando principalmente a importância da inclusão do cálculo de capacidade das aeronaves pelo modelo de acordo com a distância de cada trajeto a ser realizado, o que possibilitou também a escolha do mix de frota ideal pelo modelo.

A utilização do modelo revisado apresenta-se como uma oportunidade para a Petrobras, pois trará informações mais precisas para auxiliar os gestores nas tomadas de decisão no planejamento da rede logística de transporte de passageiros para trabalho *offshore*. Por informações mais precisas para os gestores entende-se:

- a) Possibilidade de definição do mix ideal de frota, inexistente no modelo básico;
- b) Possibilidade de cálculo anual da ocupação das aeronaves, em vez de consideração de parâmetro histórico estático;

- c) Representação mais realista das distâncias percorridas na Bacia de Campos, considerando as regras da nova Carta Aeronáutica da região;
- d) Representação no modelo dos custos de operação e investimentos nos aeródromos, não considerados no modelo básico;
- e) Alocação mais inteligente dos pontos de demanda aos aeródromos, levando em consideração a capacidade das aeronaves para cada ponto de demanda em vez de parâmetros históricos médios para todas as unidades marítimas; e
- f) Resultados mais precisos de localização ótima de aeródromos, levando-se em conta que os itens de a até e descritos acima influenciam no cálculo da função objetivo do problema.

A realização de estudos futuros para aprofundamento deste modelo de localização e planejamento de rede logística de movimentação de passageiros para trabalho em unidades de exploração e produção de petróleo offshore é recomendada. Uma sugestão é a inclusão de investimento variável com o número de aeronaves máximo alocadas a um aeródromo, de forma a representar a parcela do investimento que varia com o porte da infraestrutura montada. Este refinamento, entretanto, tornará o modelo não-linear.

Ainda referindo-se à modelagem utilizada, indica-se para estudos futuros a consideração de demanda estocástica, já que esta é dependente de parâmetros com elevado grau de incerteza como a quantidade e localização de sondas de perfuração em operação em cada período de tempo.

Outras possibilidades de estudos futuros envolvem a associação de heurísticas ao modelo de programação inteira de forma a possibilitar a obtenção do ótimo, já que neste estudo de caso assumiu-se como aceitáveis soluções sub-ótimas (*MIP Relative Optimality Tolerance* = 3,00%, conforme descrito na seção 6.2). A utilização de heurísticas associadas ao modelo de otimização possibilitará a ampliação das instâncias rodadas, viabilizando rodadas integradas para o planejamento de rede logística *offshore* da Petrobras para todo o Brasil, não apenas o Sul-Sudeste.

A adaptação do modelo para estudo de caso em outras regiões onde haja operações *offshore* também será academicamente relevante, além de representar ganhos

potenciais para empresas que venham a se beneficiar do estudo.

Adicionalmente, enxerga-se como possibilidade de contribuição acadêmica, a realização de estudos de *benchmark* para diversas instâncias deste modelo entre diferentes solvers, em especial CPLEX e GUROBI, tanto utilizando processamento em série como em paralelo, de forma a apontar qual o solver comercial mais adequado para este tipo de problema.

Por fim, como complemento ao trabalho realizado, recomenda-se realização de estudos futuros para definição das configurações internas do AIMMS e do solver associado que proporcionam o melhor desempenho deste modelo. Este estudo dará continuidade ao trabalho de HUTTER *et. al.* (2010), que desenvolveram uma ferramenta de configuração automática de solvers de MIP, obtendo melhorias expressivas de desempenho para os conjuntos de problemas testados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BICOMBUSTÍVEIS. *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Bicombustíveis*. Rio de Janeiro, RJ, 2009, 218 p.

AIS/DECEA: Carta *Aeronáutica da TMA Macaé*. Outubro de 2009 (Disponível em: <http://www.aisweb.aer.mil.br>) Acessado em: 24/01/2011.

AZARMAND, Z., JAMI, E. N.: *Location allocation Problem*. In: FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M. (Editores). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science*. Physica-Verrlag Heidelberg. 2009. Páginas 93-109

BARBOSA, G.R., ALMEIDA, A.T.: *Sistema de Apoio a Decisão sob enfoque de profissionais de TI e Decisores*. Curitiba - Abepro, 2002.

BISSCHOP, J, ENTRIKEN, R.: *AIMMS the Modeling System*. Paragon Decision Technology. 2002 (Disponível no endereço: <http://www.aimms.com>).

BISSCHOP, J. : *AIMMS Optimization Modeling* . Paragon Decision Technology. 2009 (Disponível no endereço: <http://www.aimms.com>).

BORNSTEIN, C. T., AZLAN, H. B.: *The use of reduction tests and simulated annealing for the capacitated plant location problem*. Location Science, Volume 6, Número 1-4, Maio-Dezembro 1998, Páginas 67-81.

BRITTAN, D., DOUGLAS, S.: *Offshore Crew Supply - Modern Marine Options Challenge Helicopters*. Society of Petroleum Engineers, Setembro de 2009

CAMARGO, R.S., MIRANDA JR, G., LUNA, H.P.: *Benders decomposition for the uncapacitated multiple allocation hub location problem*. Computers & Operations Research, Volume 35, Número 4, Abril de 2008, Páginas 1047-1064.

COMANDO DA AERONÁUTICA. ICA 100-12 - *Tráfego Aéreo - Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo*. Ministério da Defesa, 2009.

DUPONT, L.: *Branch and bound algorithm for a facility location problem with concave site dependent costs*. International Journal of Production Economics, Volume 112, Número 1, Março 2008, Páginas 245-254.

DREZNER, Z., HAMACHER, H. W. (Editores). *Facility Location: Applications and Theory*. Springer. New York, 2004.

DREZNER, Z., KLAMROTH, K., SCHÖBEL, A. WESOLOWSKY, G. O.: *The Weber Problem*. In: DREZNER, Z., HAMACHER, H. W. (Editores). *Facility Location: Applications and Theory*. Springer. New York, 2004. Páginas 1-36.

EIERMAN, M.A., NIEDERMAN, F., ADAMS, C.: *Decision Support Systems*. Volume 14, Número 1, Maio de 1995, Páginas 1-26

- FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M. (Editores). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science*. Physica-Verlag Heidelberg. 2009.
- FARAHAMI, R. Z., ABEDIAN, M., SHARAH, S.: *Dynamic Location Problem*. In: FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M. (Editores). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science*. Physica-Verlag Heidelberg. 2009. Páginas 347-372
- GABRIELLI, S.J., BARBASSA, A.: *Plano de Negócios 2010-2014*. Petrobras, 2010 (Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/ri>) Acessado em 05/02/2011
- GALVÃO, R. D.: *Uncapacitated facility location problems: contributions*. Pesquisa Operacional, Volume 24, Número 1, Janeiro a Abril de 2004, Páginas 7-38
- 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, Volume 49, Número 2, 1990, Páginas 266-270.
- GEOFRION, A.M., MORRIS, J., WEBSTER, S.: *Distribution System Design*. In: DREZNER, Z. (Editor): *Facility Location: A Survey of Applications*, Z. Drezner (Editor). Springer-Verlag, New York. 1995. Páginas 190-191
- GHOSH, D.: *Neighborhood search heuristics for the uncapacitated facility location problem*. European Journal of Operational Research, 2003. Páginas 150–162.
- HALE, T.: *Trevor Hale's location science references*. Disponível em: <http://gator.dt.uh.edu/~halet/>. Acessado em 13/01/2011.
- HERMETO, T. S.: *A utilização do Sistema de Apoio à Decisão para escolha de Bases Aeroportuárias Offshore*. Rio de Janeiro. Dezembro de 2009 - MTBI – UFRJ
- HOLMBERG, K., RÖNNQVIST, M., YUAN, D.: *An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing*. European Journal of Operational Research, Volume 113, Número 3, 16 de Março de 1999, Páginas 544-559.
- HORONJEFF, R.; MCKELVEY, F.: *Planning and Design of Airports*. New York. MacGraw-Hill, 4ª Edição, 1993.
- HUTTER, F., HOOS, H., LEYTON-BROWN, K.: *Automated Configuration of Mixed Integer Programming Solvers*. CP-AI-OR 2010.
- IGNÁCIO, A.A.V., FERREIRA FILHO, V.J.M.: *Seção de Software: o uso de software de modelagem AIMMS na solução de problemas de programação matemática*. Pesquisa Operacional. Volume 24, Número 1, Janeiro a Abril de 2004, Páginas 197-210.
- INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN : *Panorama "Custos Logísticos no Brasil 2010"*. Rio de Janeiro, 2010
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO): *Aeródromos, Anexo 14*, Volume 1, 3ª edição, Julho de 1999.

LAUX, P.F.: *S-61 O Pioneiro Offshore*. Aeromagazine. Edição 197. 2010 (Disponível em: <http://aeromagazine.uol.com.br/revista/197/s-61-o-pioneiro-do-offshore/>) Acessado em 25/01/2011

LOPES, P.H.M., SANTOS, W.E.D.: *Considerações sobre tributos e estoques na modelagem de redes logísticas*, DEI-POLI/UFRJ, Dezembro de 2006

MARIĆ, M.: *An efficient genetic algorithm for solving the multi-level uncapacitated facility location problem*. Computing and Informatics, Volume 29, Número 2, 2010, Páginas 183-201

MARINHA DO BRASIL: *Norma da Autoridade Marítima 01 – Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto*. Capítulo 6. 2010 (Disponível em: https://www.dpc.mar.mil.br/normam/tabela_normam.htm) Acessado em: 25/01/2011.

MENEZES, F., PORTO, O., REIS, M.L., MORENO, L., ARAGÃO, M.P., UCHOA, E., EBELEDO, H., NASCIMENTO, N.: *Optimizing Helicopter Transport of Oil Rig Crews at Petrobras*. Interfaces, Volume 40, Número 5, Setembro-Outubro de 2010, Páginas 408-416.

MITTELMANN, H.: *Mixed Integer Linear Programming Benchmark*. (Disponível em: <http://plato.asu.edu/ftp/milpc.html>) Acessado em 04/04/2011

REVELLE, C.S., EISELT, H.A., DASKIN, M.S.: *A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science*. European Journal of Operational Research, Volume 184, Número 3, 1 de Fevereiro de 2008, Páginas 817-848

ROCHA, P.P.F.: *Modelo de Dimensionamento de Frota de Helicópteros para um sistema de distribuição física de pessoas voltada às atividades offshore de exploração e produção de uma bacia petrolífera: Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado - UFSC. Florianópolis, SC, 2001.

ROMERO, M., SHEREMETOV, L., SORIANO, A.: *A Genetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem: An Application to the Helicopter Offshore Transportation*. *Theoretical Advances and Applications of Fuzzy Logic and Soft Computing*. Springer Berlin / Heidelberg, Volume 42, 2007.

SENA, N. S., FERREIRA FILHO, V. J. M.: *Localização de aeroportos para transporte de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo offshore*. Anais do IX Simpósio de Transporte Aéreo, Sociedade Brasileira de Transporte Aéreo. Manaus, Novembro de 2010. Páginas 129-142.

SENA, N.S, LEITE, R.P, MASSUDA, E.T., PRALLON, E.D.: *Plano Diretor Logístico do E&P. 5º Seminário de Planejamento, Controle e Avaliação de Desempenho no E&P*. Setembro de 2010. (Artigo publicado em Seminário Interno da PETROBRAS)

SHERALI, H.D., BAE, K., HAOUARI, M.: *Integrated Airline Schedule Design and Fleet Assignment: Polyhedral Analysis and Benders' Decomposition Approach*. INFORMS Journal of Computing. Volume 22, Número 4, 2010. Páginas 500-513.

SIERKSMA, G., TIJSSEN, G.A.: *Routing helicopters for crew exchanges on off-shore locations*. Annals of Operations Research 76, 1998, Páginas 261 – 286.

- SIMCHI-LEVI, D., KAMINSKY, P., SIMCHI-LEVI, E.: *Cadeia de Suprimentos – Projeto e Gestão*. Bookman. São Paulo, 2000, Páginas 41-42.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON R. *Administração da Produção*. 2ª edição. São Paulo: Atlas, 2002. 742 p.
- SPOUGE, J.R., SMITH, E.J., LEWIS, K.J.: *Helicopter or Boats- Risk Management options for transport offshore*. Society of petroleum engineers, 1994.
- STRONG, P. A.: *Reducing Incidents in Marine Personnel Transfer*. Society of petroleum engineers, Reflex Marine Ltd, 2008
- TAFAZZOLI, S., MOZAFARI, M.: *Classification of Location Models and Location Softwares*. In: FARAHANI, R. Z., HEKMATFAR, M. (Editores). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies: Contributions to Management Science*. Physica-Verrlag Heidelberg. 2009. Páginas 505-521
- TAM, B., EHRGOTT, M., RYAN, D., ZAKERI, G.: *A comparison of stochastic programming and bi-objective optimisation approaches to robust airline crew scheduling*. OR Spectrum. Volume 33, Número 1, Janeiro de 2011. Páginas 49-75.
- TRAGANTALERNGSAK, S., HOLT, J. RÖNNQVIST, M.: *An exact method for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem*. European Journal of Operational Research, Volume 123, Número 3, 16 de Junho de 2000, Páginas 473-489.
- VERTER, V.: *Uncapacited and Capacited Facility Location Problems*. In: EISELT, H.A., MARIANOV, V. (Editores): *Foundations of Location Analysis*. International Series in Operational Research & Management Science. Springer. Volume 155. New York, 2011. Páginas 25-37.
- YAN, S., TU, Y.: *A network model for airline cabin crew scheduling*. European Journal of Operational Research. Volume 140, Número 3, Agosto de 2002. Páginas 531-540.

ANEXO I – RESULTADOS COMPLETOS

Neste anexo serão apresentados os resultados de todos os cenários rodados compostos por distribuição da demanda entre aeroportos ao longo dos anos, distribuição da frota por tipo de modal ao longo dos anos e mapas de alocação de demandas aos aeródromos.

a) Cenário 1A

Projeção de Frota:

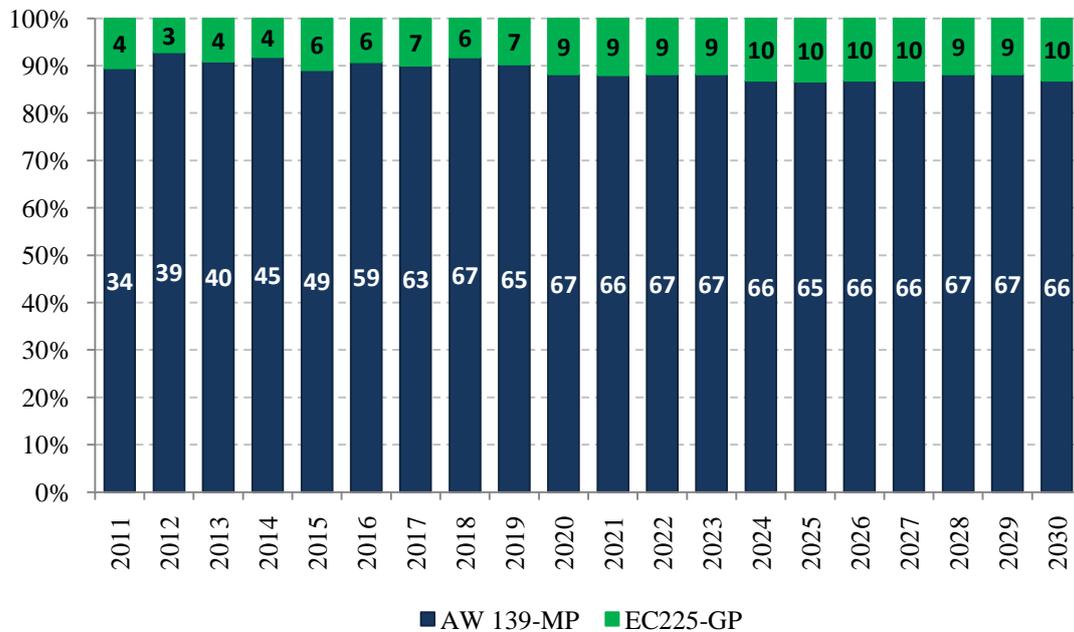


Figura 24: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

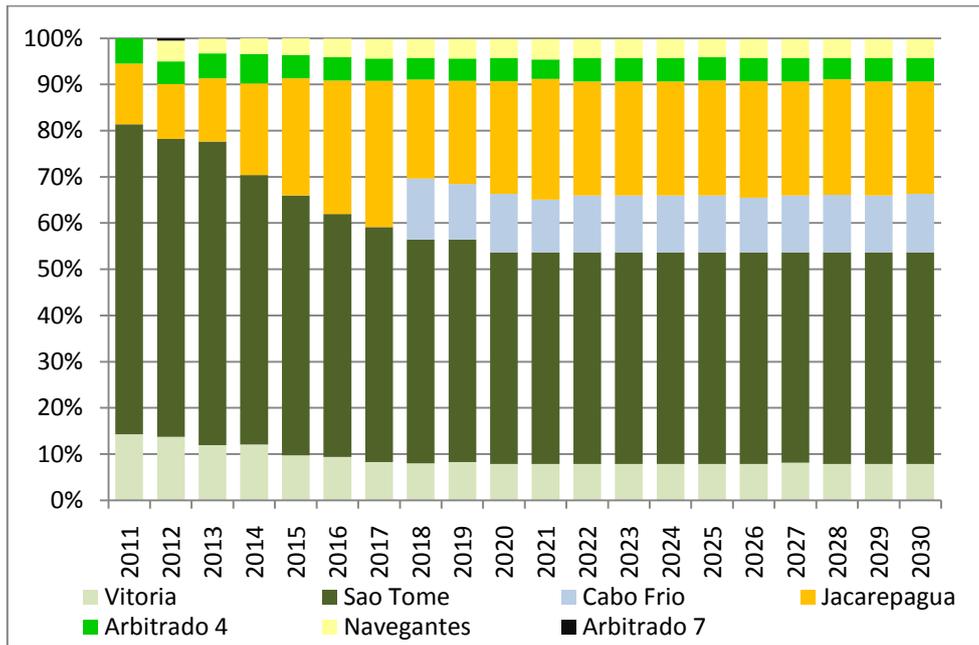


Figura 25: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

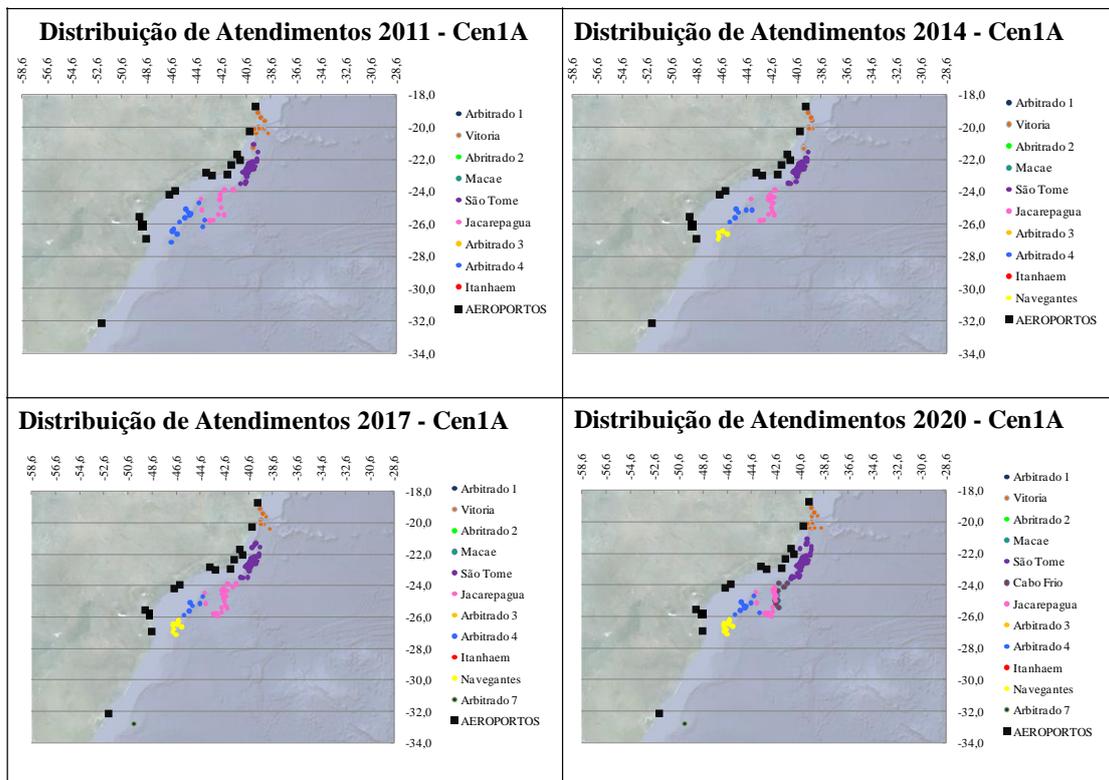


Figura 26: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1A

b) Cenário 1B

Projeção de Frota:

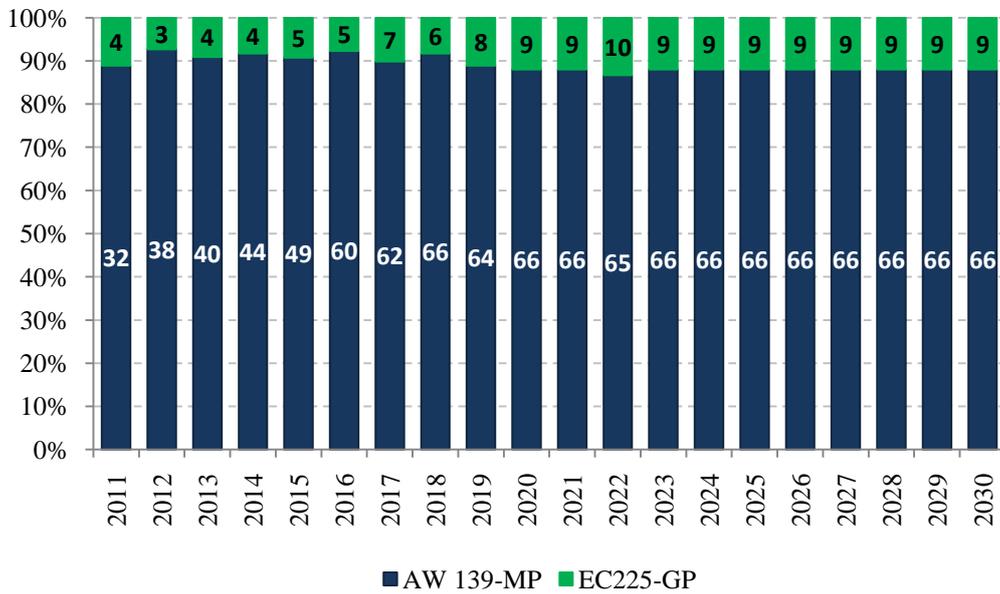


Figura 27: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

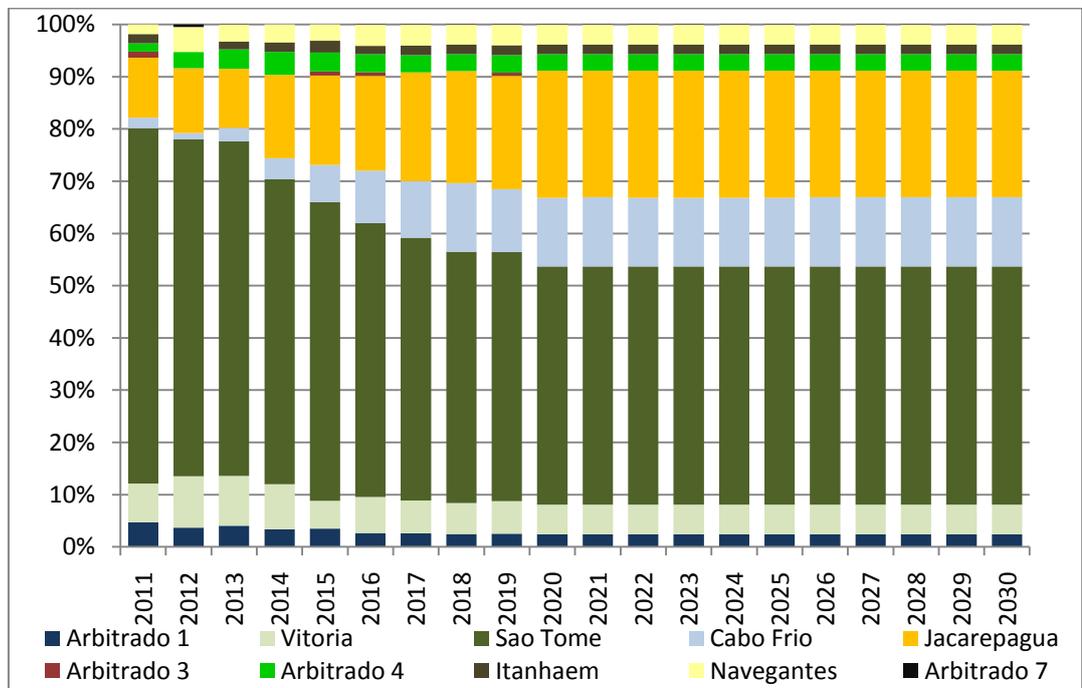


Figura 28: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

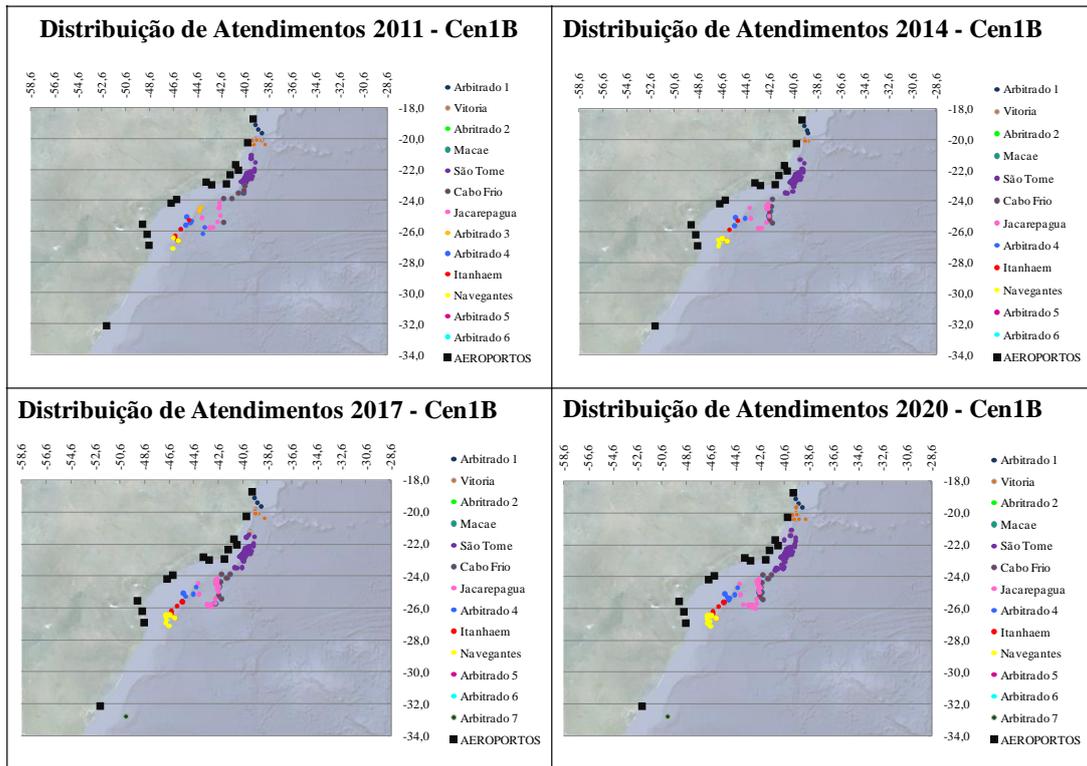


Figura 29: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1B

c) Cenário 1C

Projeção de Frota:

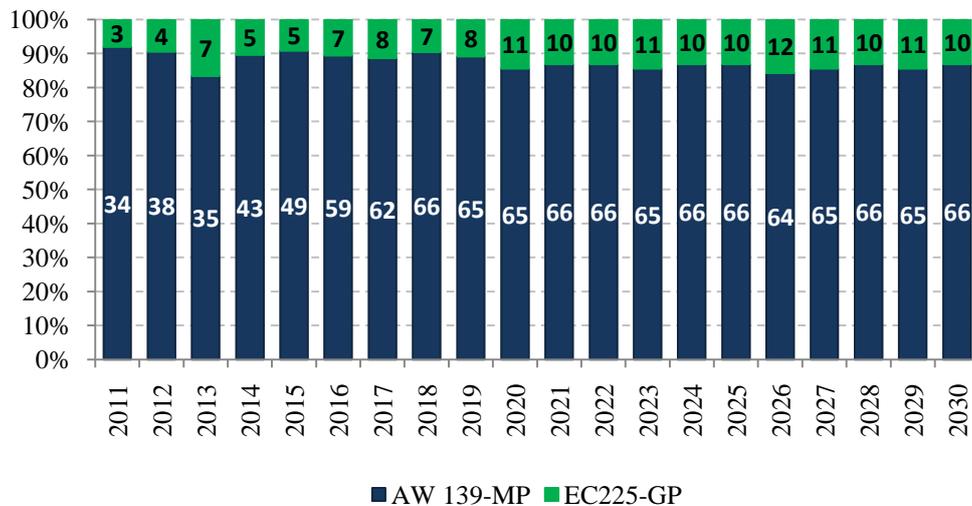


Figura 30: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

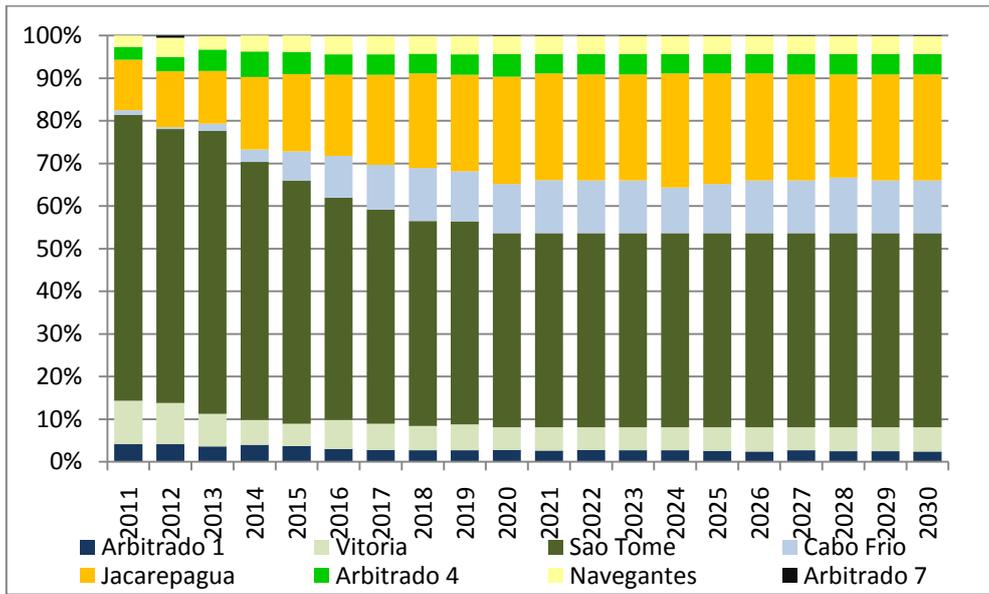


Figura 31: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

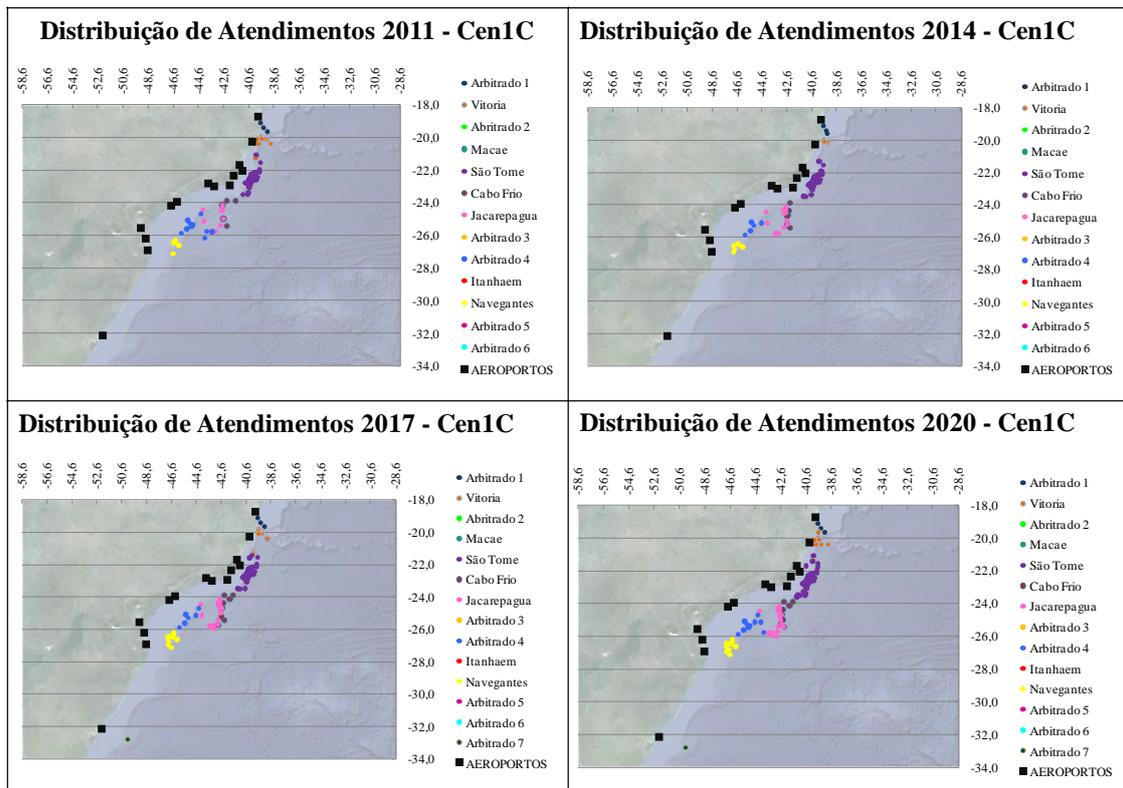


Figura 32: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1C

d) Cenário 1D

Projeção de Frota:

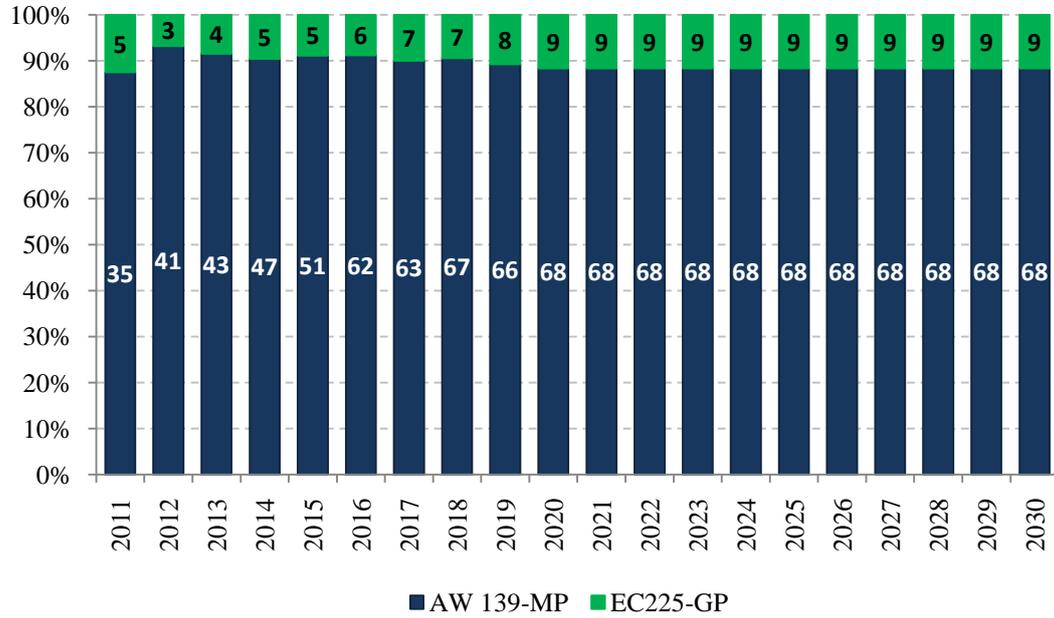


Figura 33: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 1D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

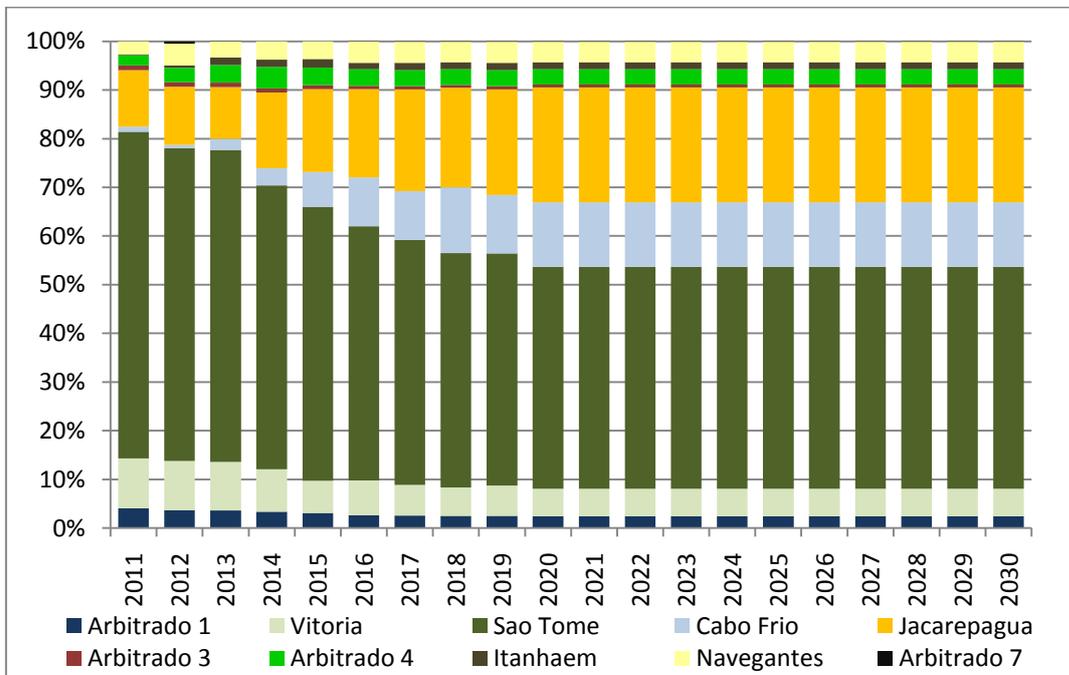


Figura 34: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 1D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

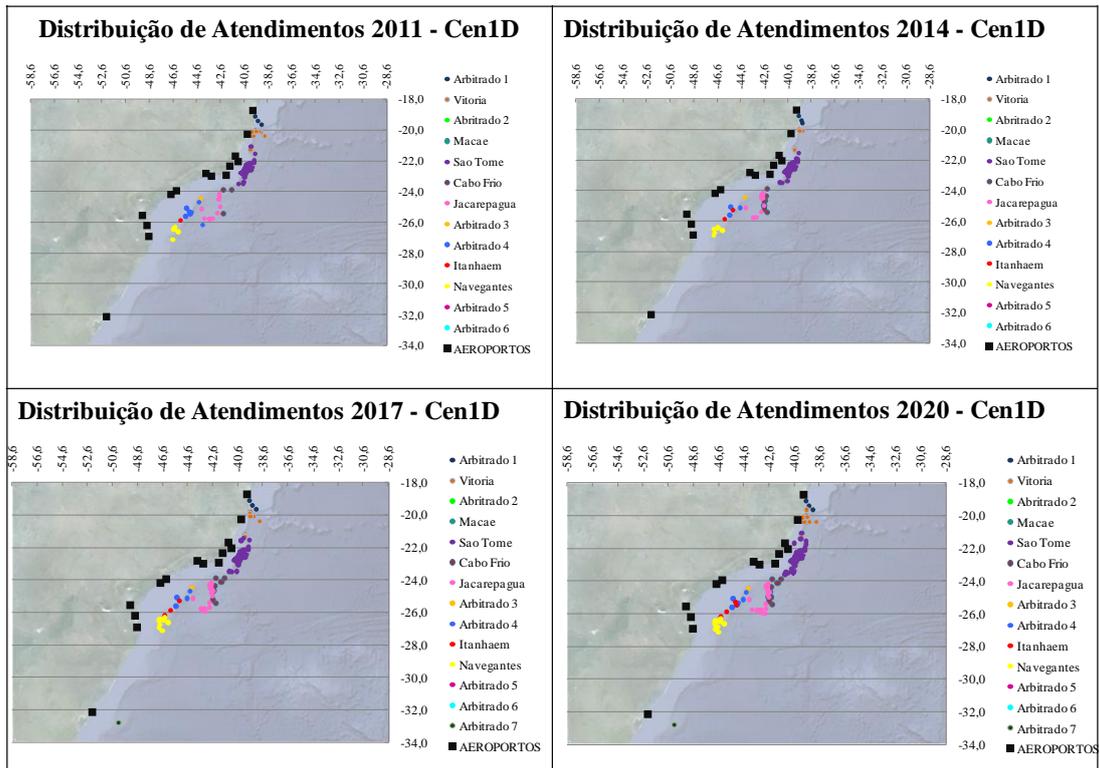


Figura 35: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 1D

e) Cenário 2A

Projeção de Frota:

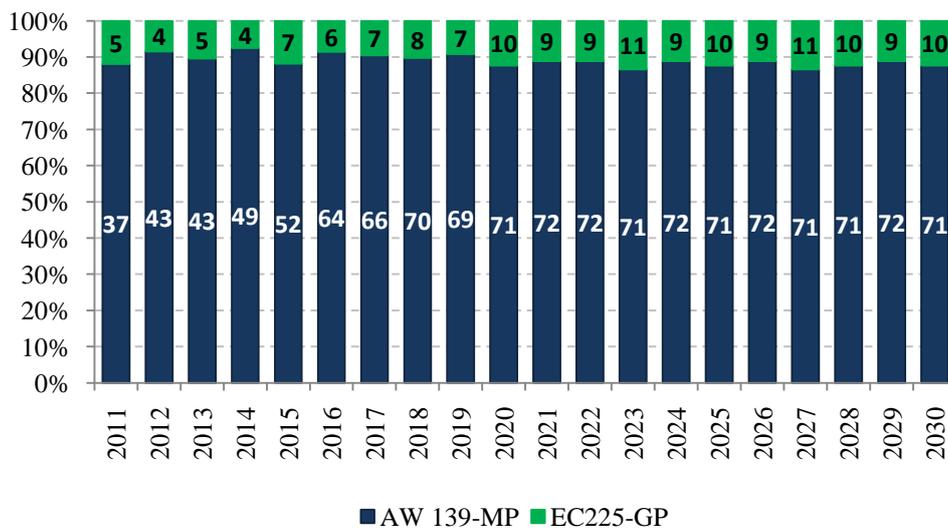


Figura 36: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

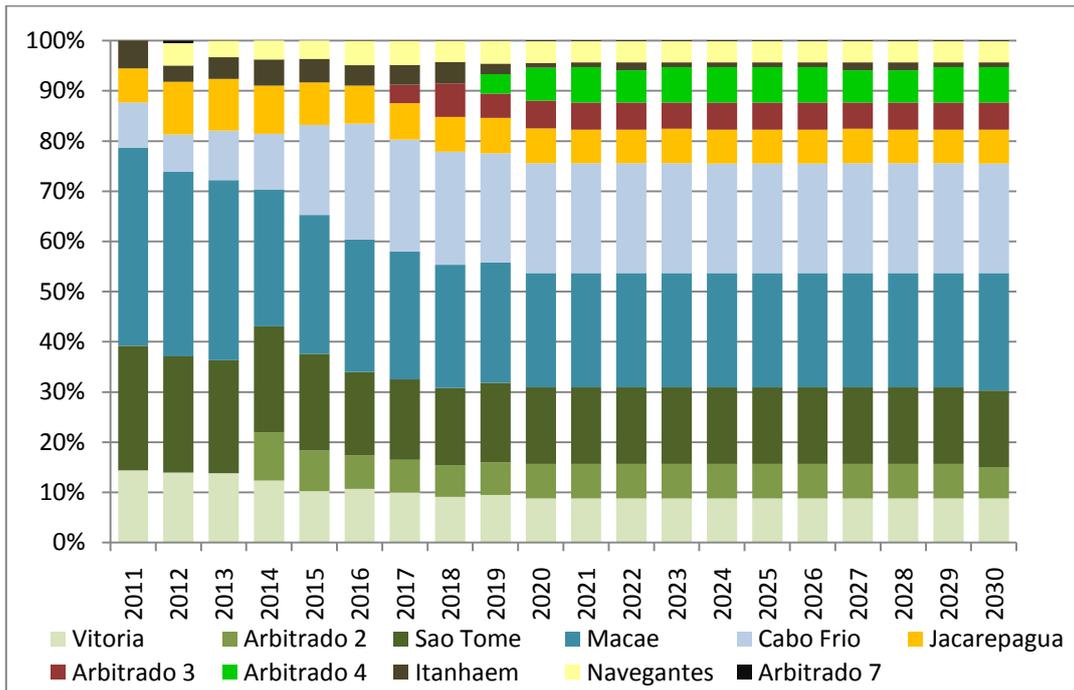


Figura 37: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

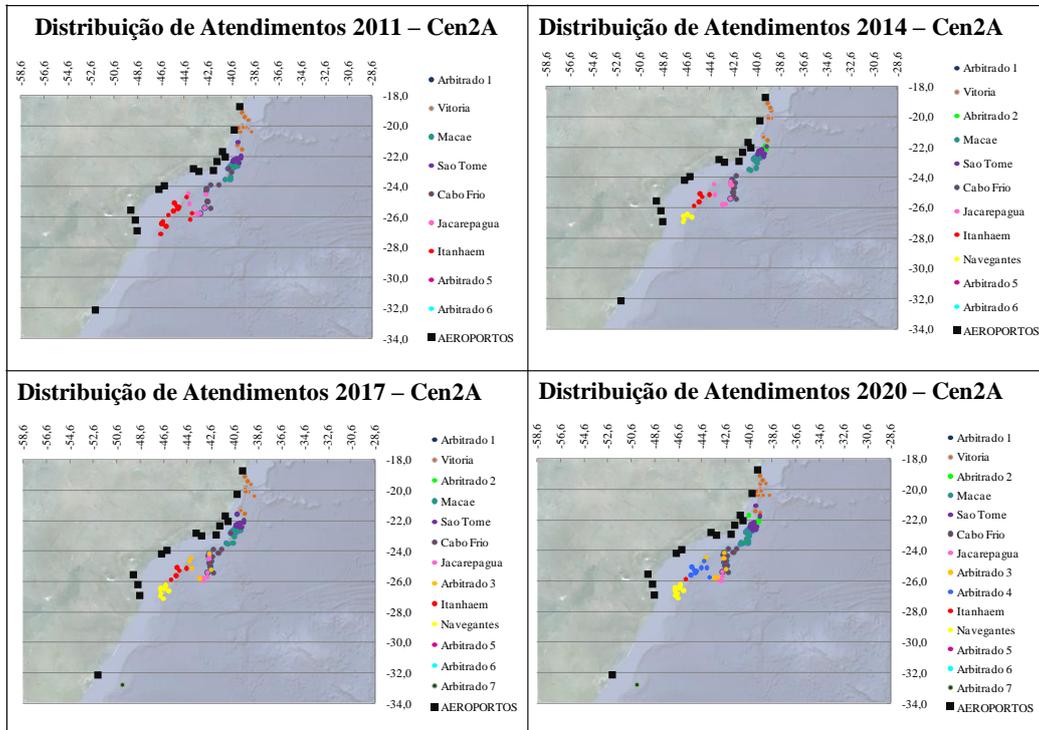


Figura 38: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2A

f) Cenário 2B

Projeção de Frota:

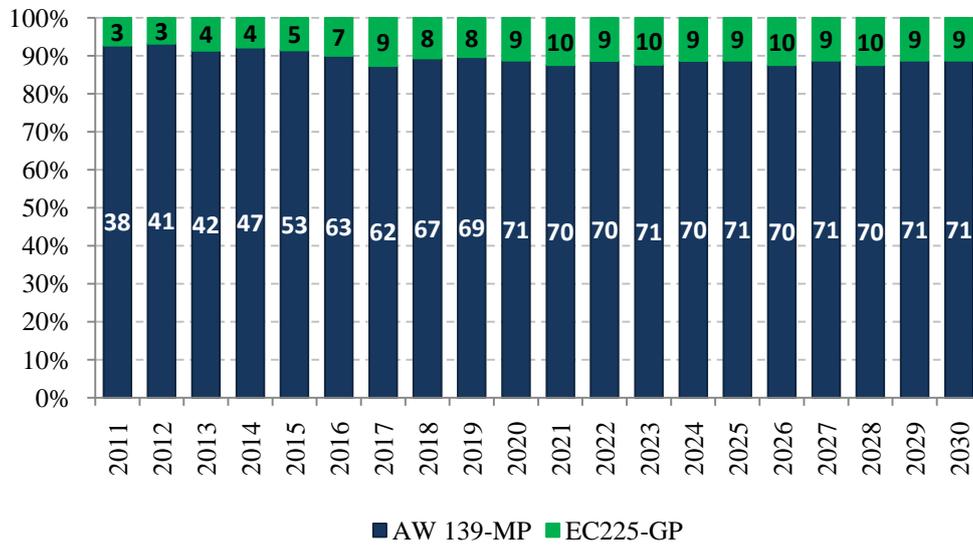


Figura 39: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

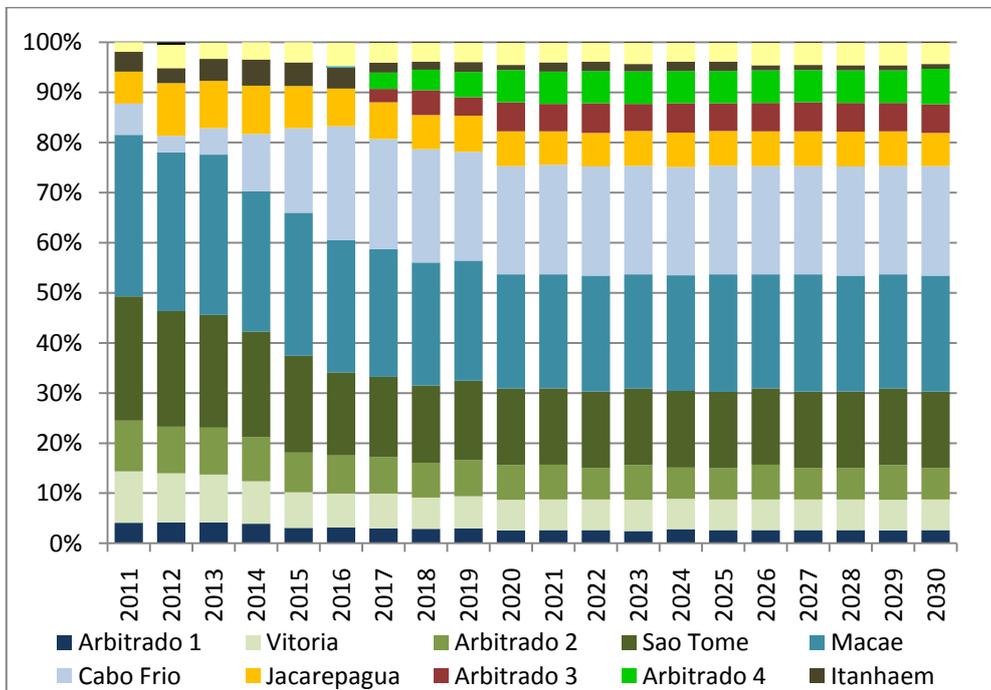


Figura 40: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

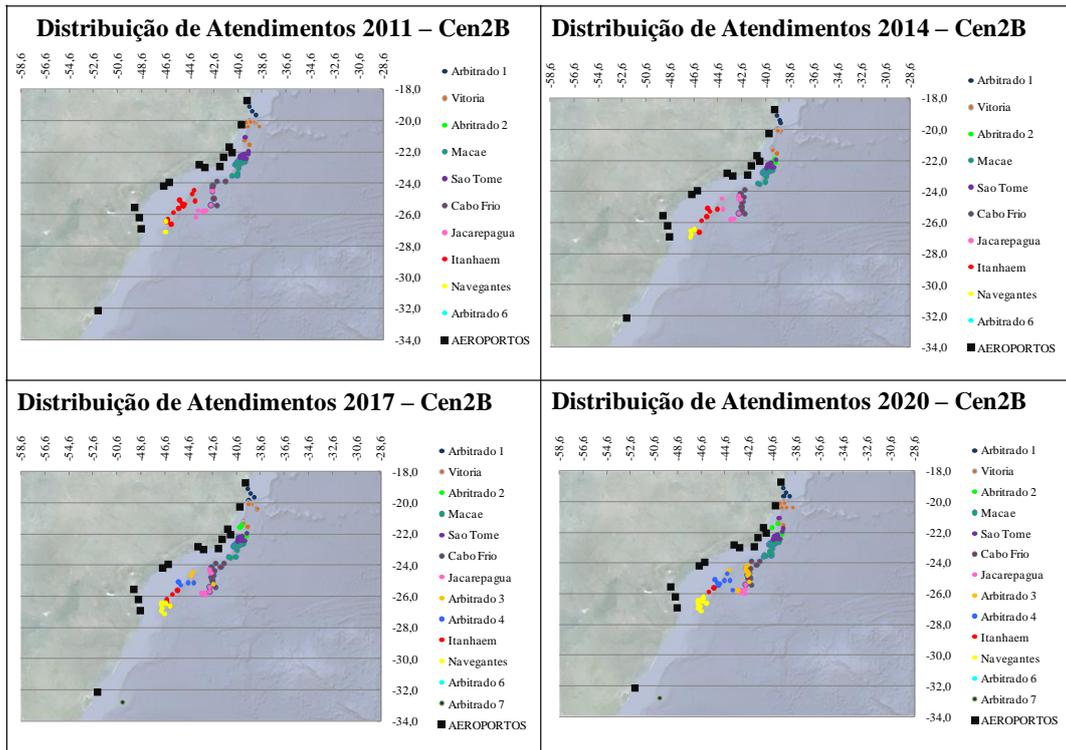


Figura 41: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2B

g) Cenário 2C

Projeção de Frota:

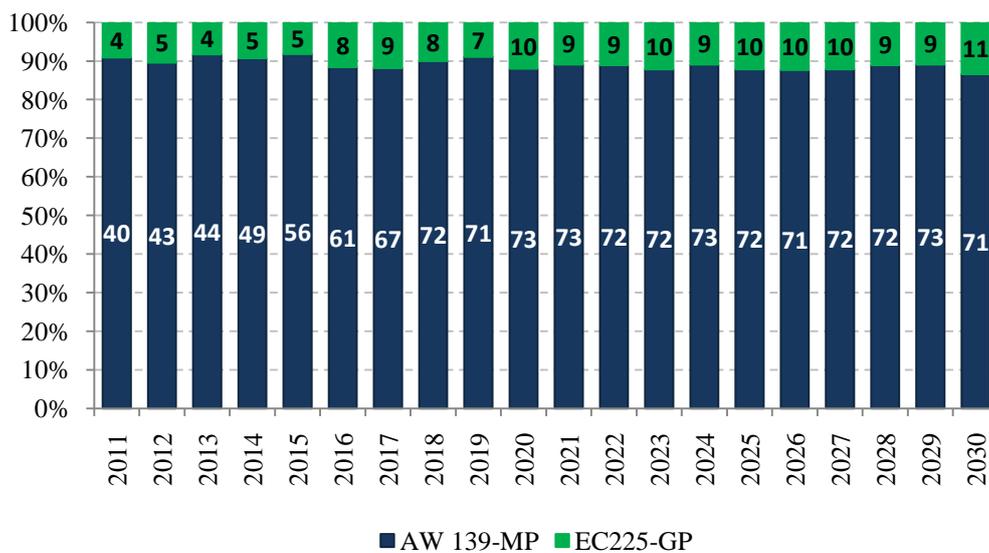


Figura 42: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

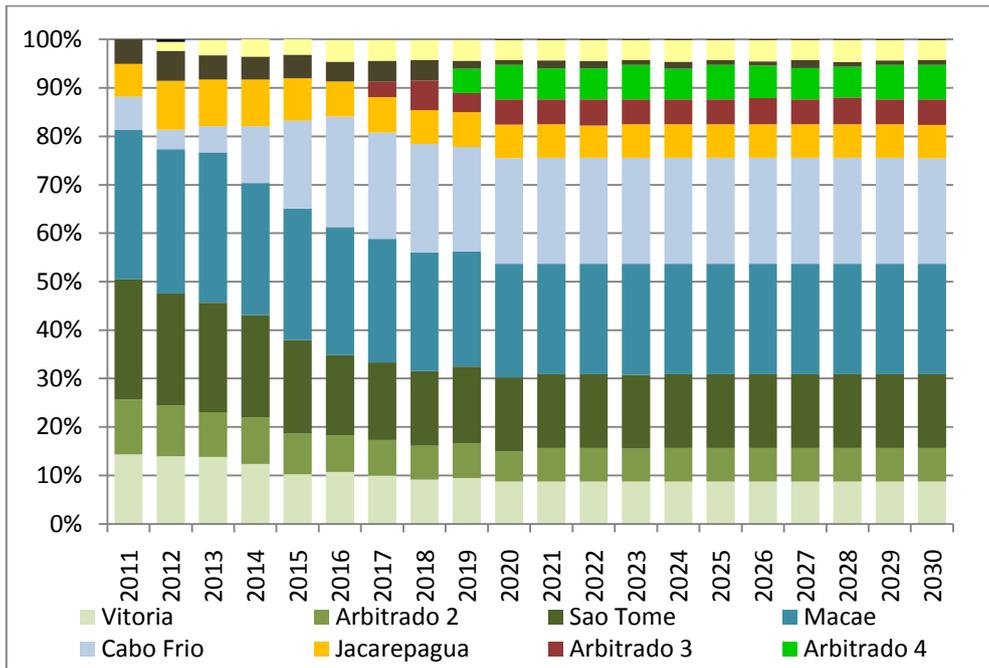


Figura 43: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

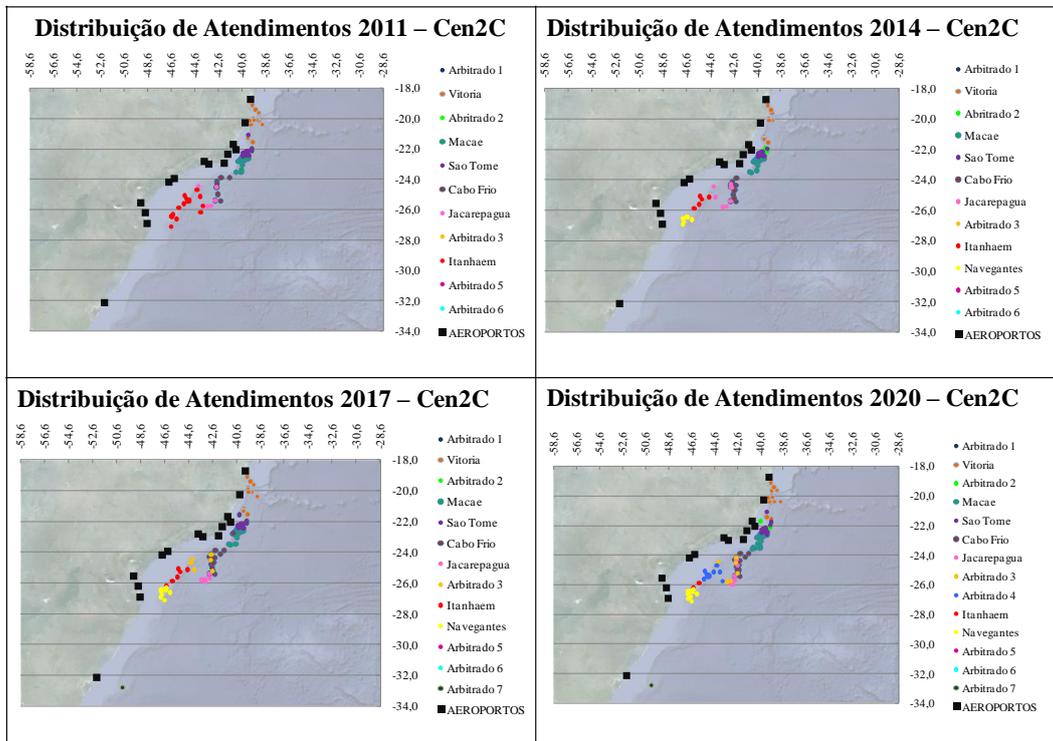


Figura 44: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2C

h) Cenário 2D

Projeção de Frota:

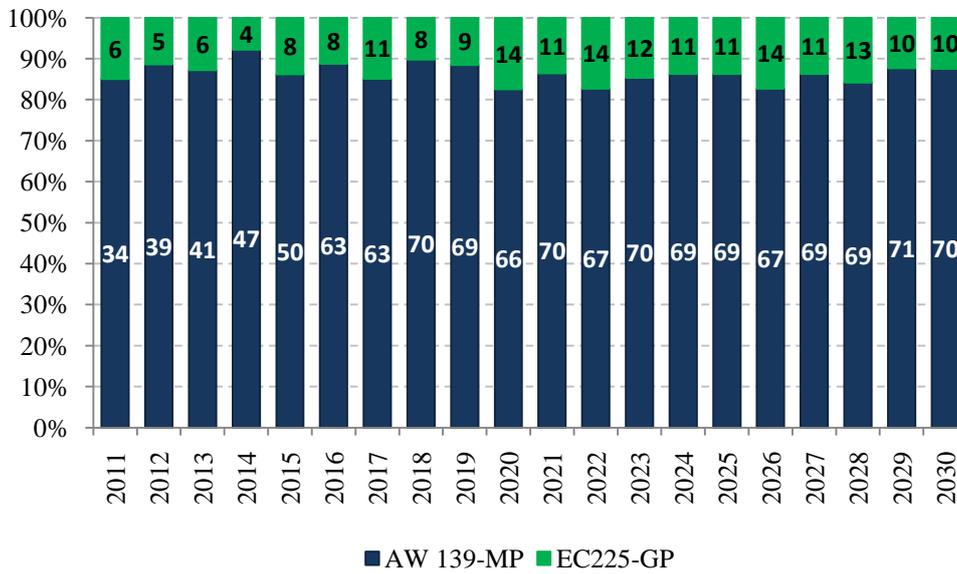


Figura 45: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 2D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

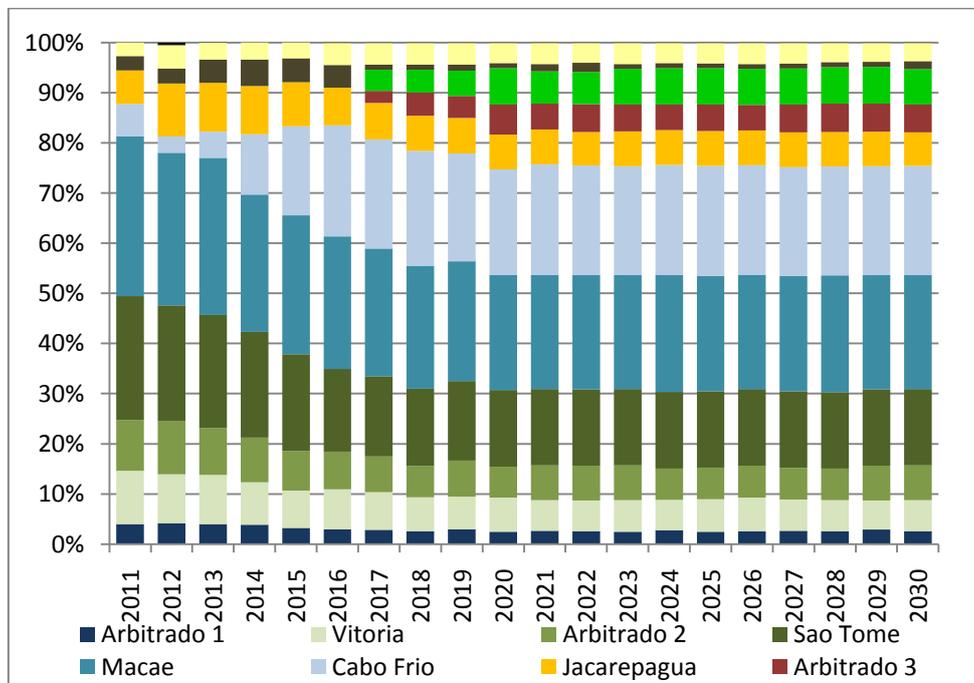


Figura 46: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 2D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

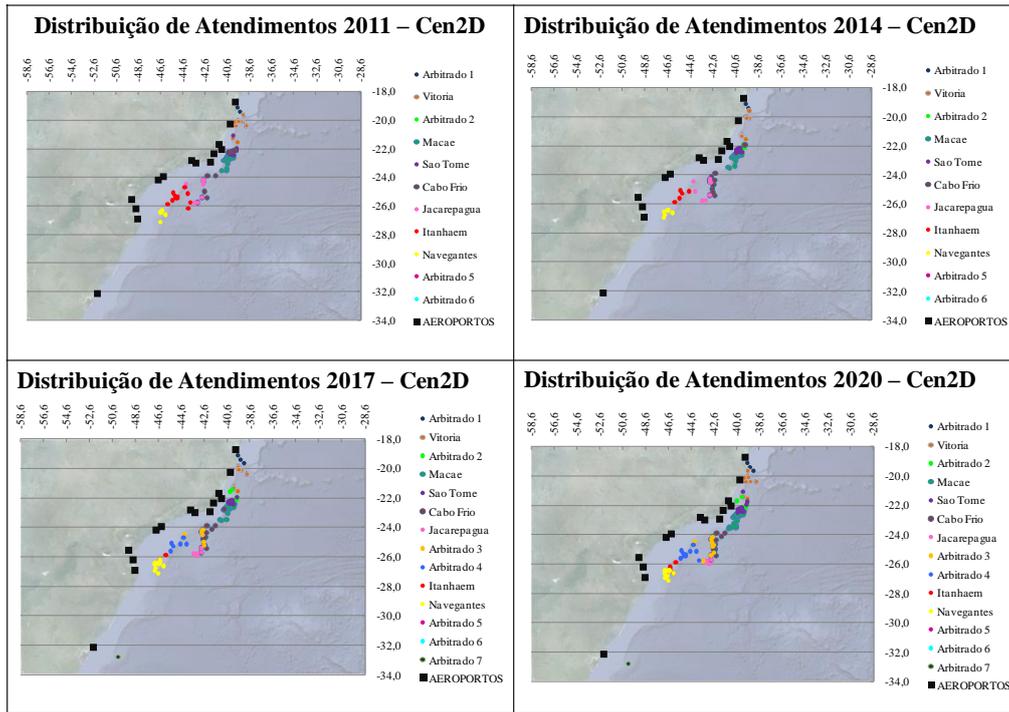


Figura 47: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 2D

i) Cenário 3A

Projeção de Frota:

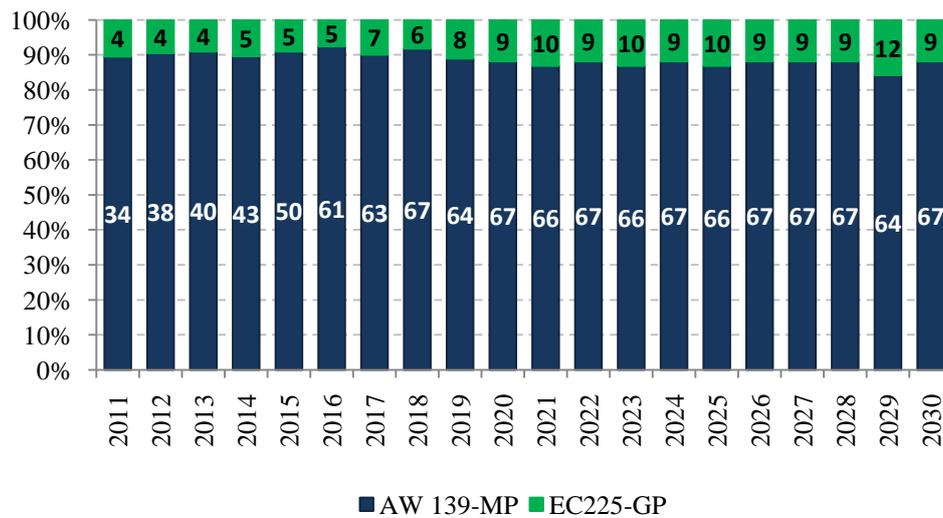


Figura 48: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

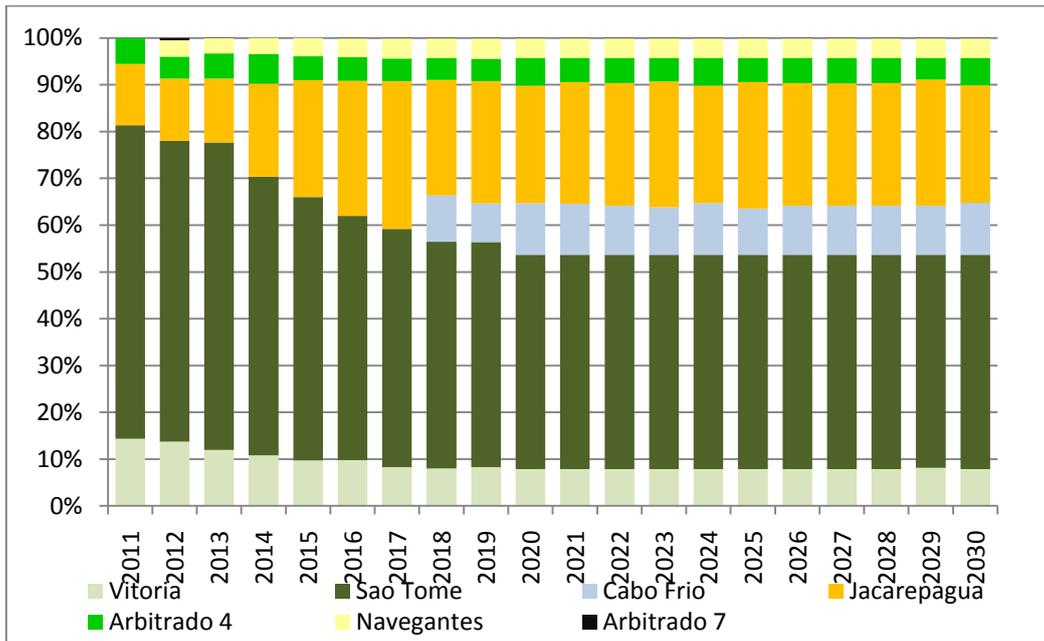


Figura 49: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

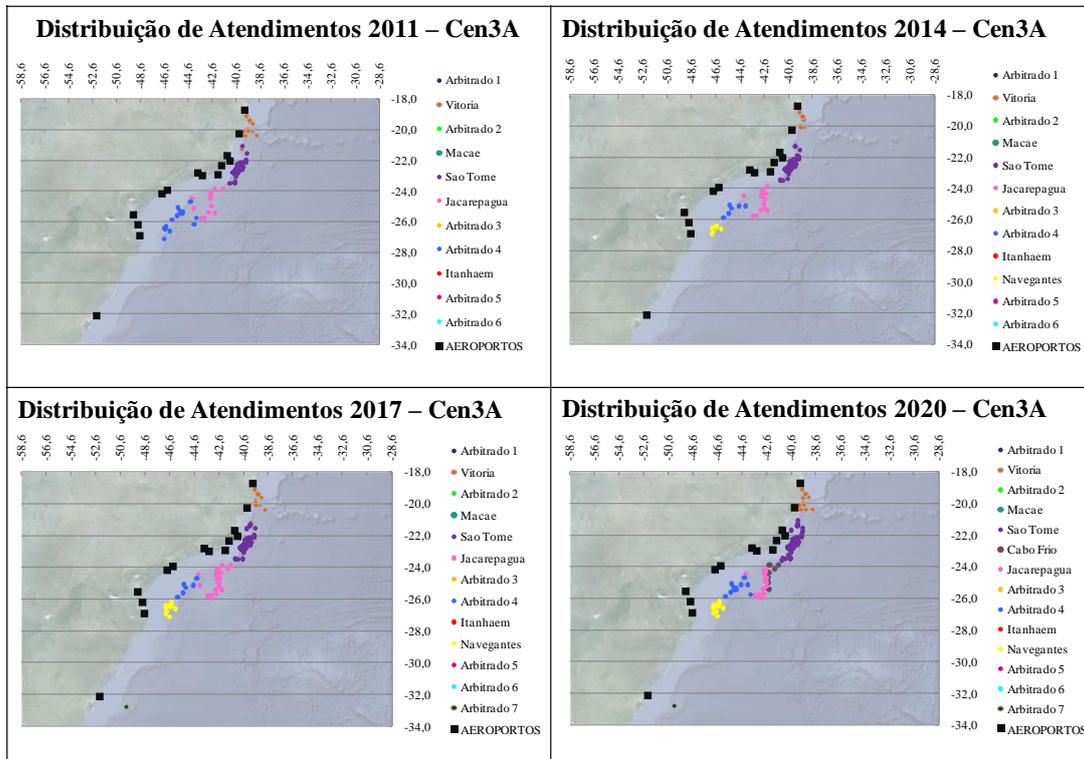


Figura 50: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3A

j) Cenário 3B

Projeção de Frota:

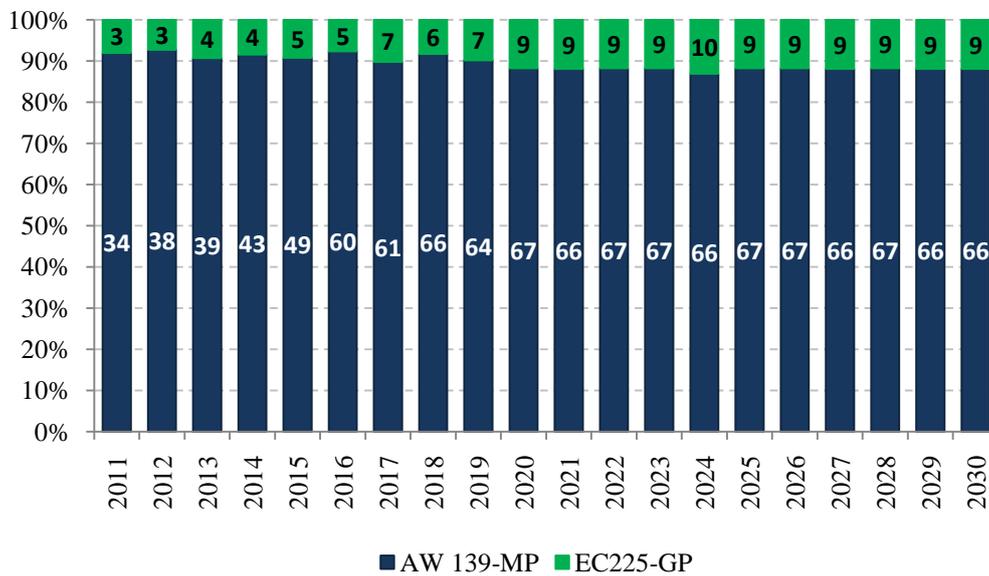


Figura 51: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

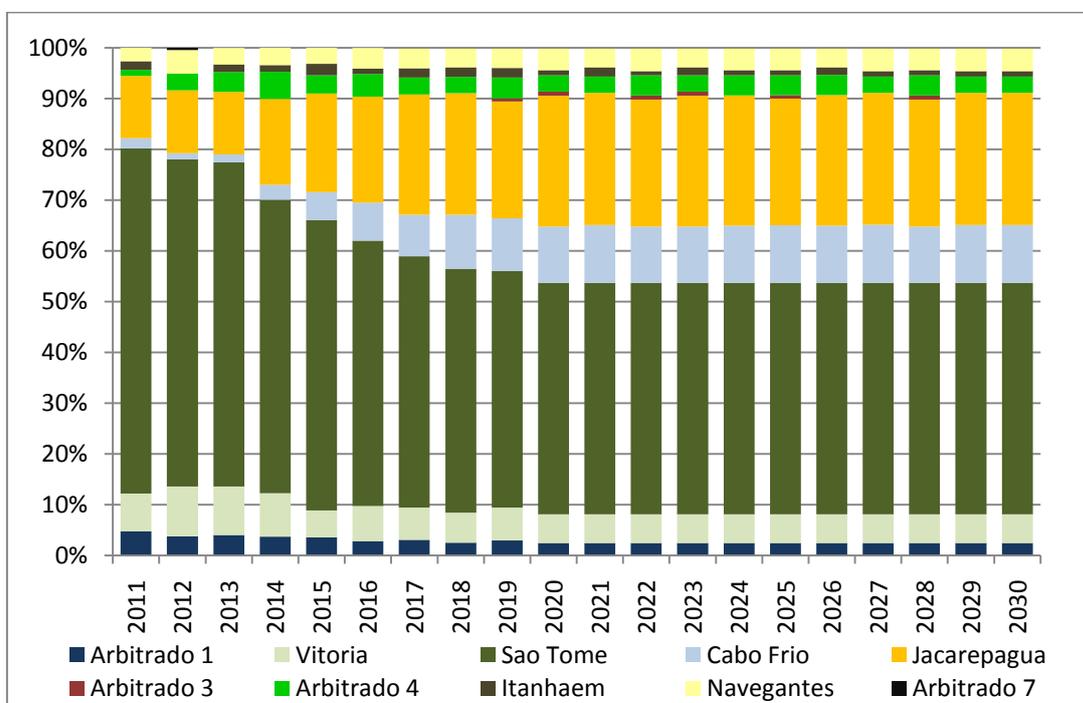


Figura 52: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

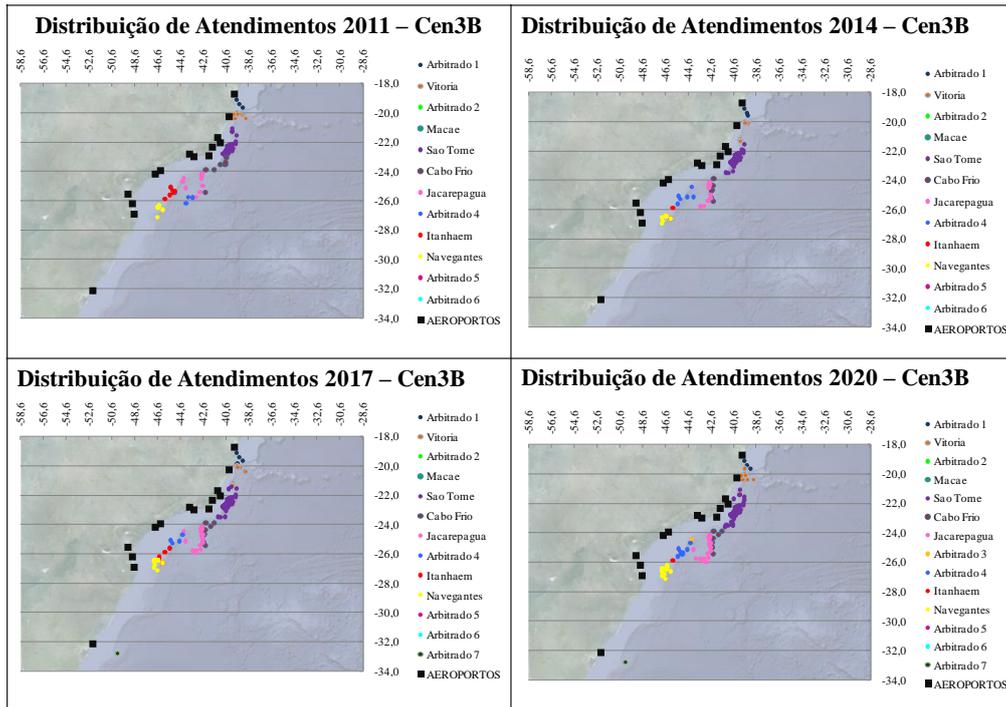


Figura 53: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3B

k) Cenário 3C

Projeção de Frota:

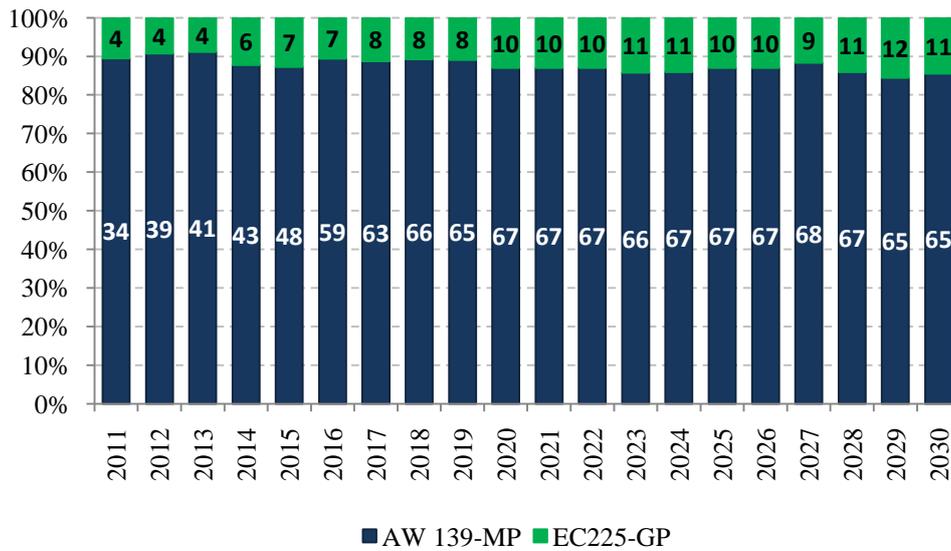


Figura 54: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

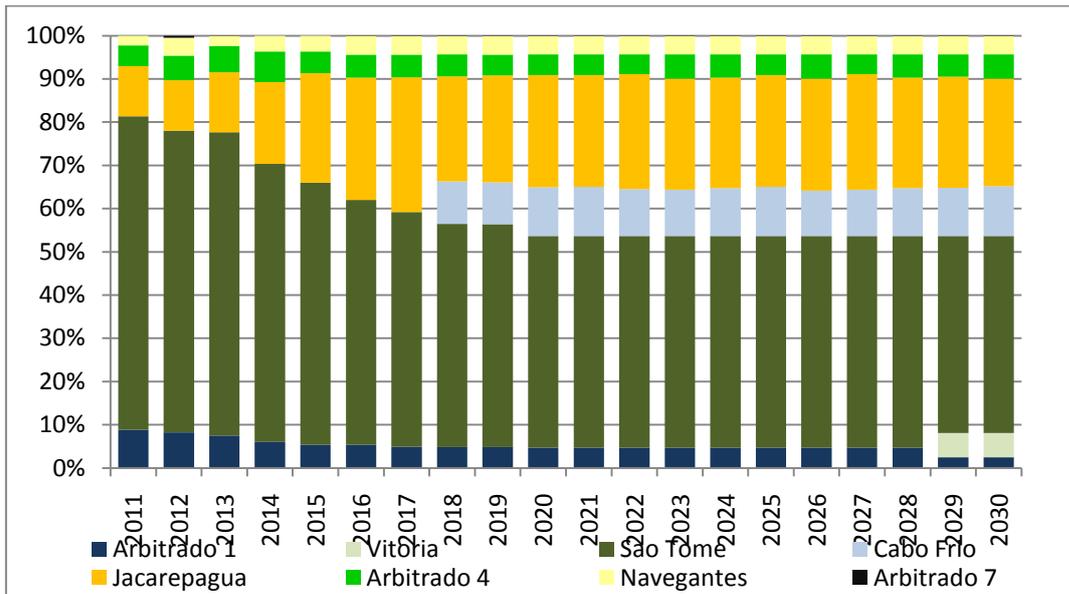


Figura 55: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

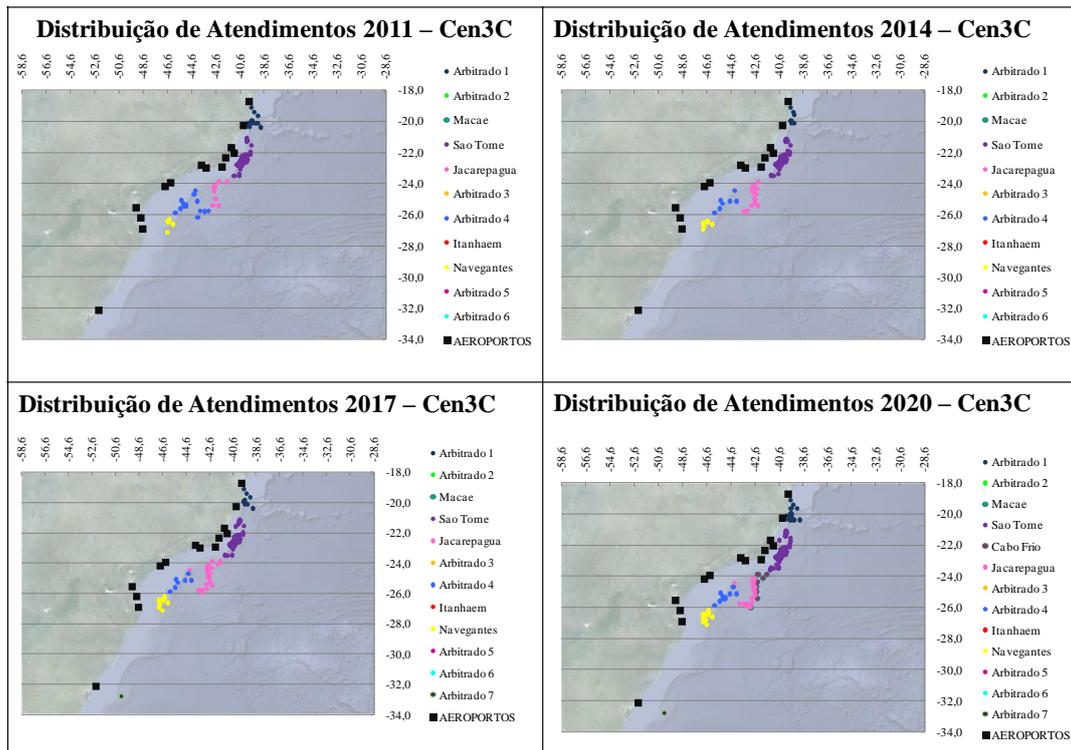


Figura 56: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3C

l) Cenário 3D

Projeção de Frota:

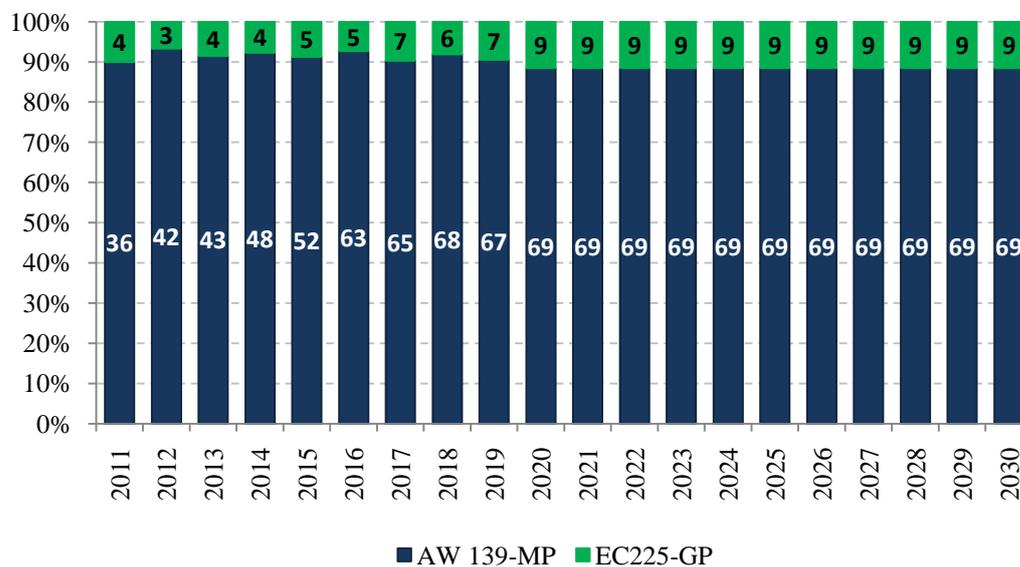


Figura 57: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 3D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

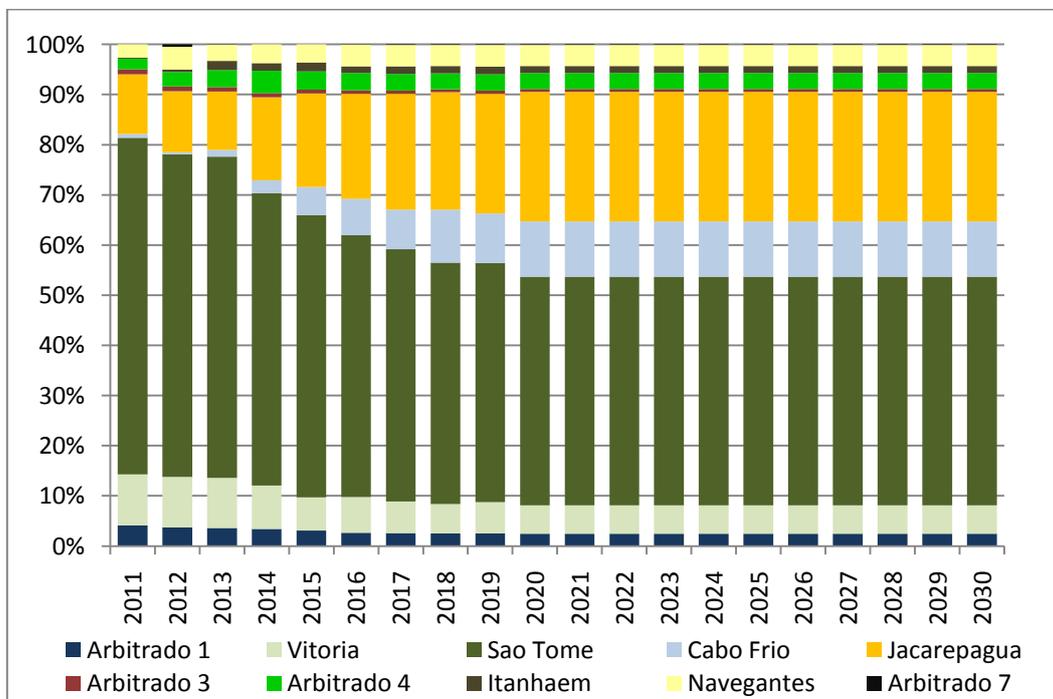


Figura 58: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 3D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

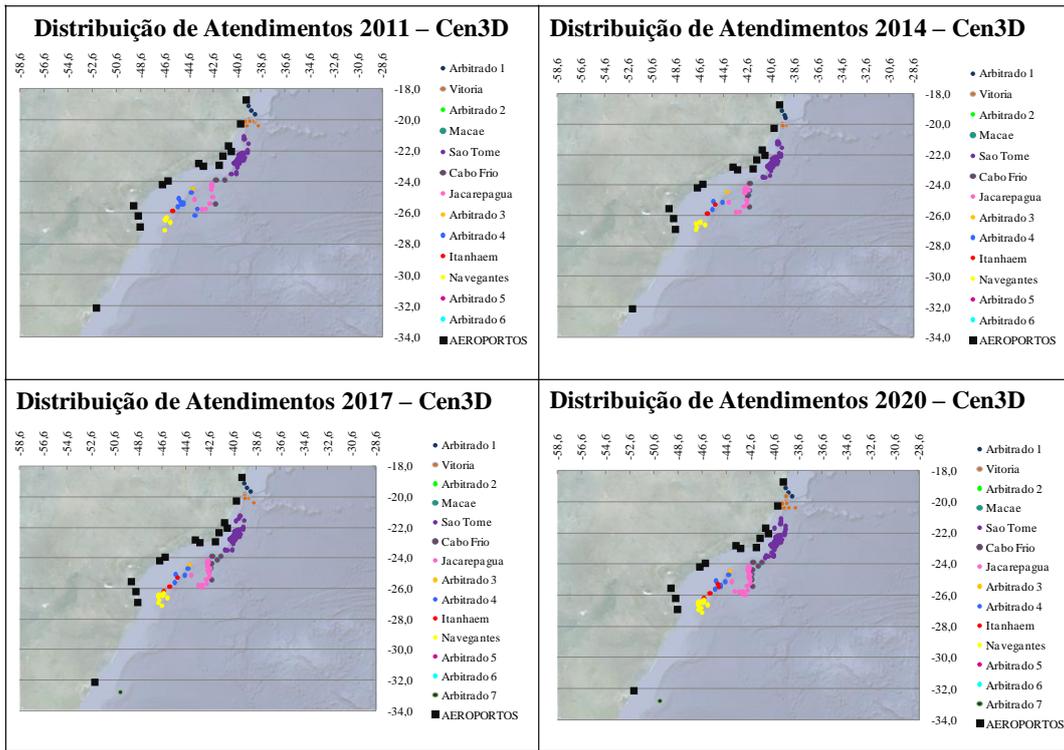


Figura 59: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 3D

m) Cenário 4A

Projeção de Frota:

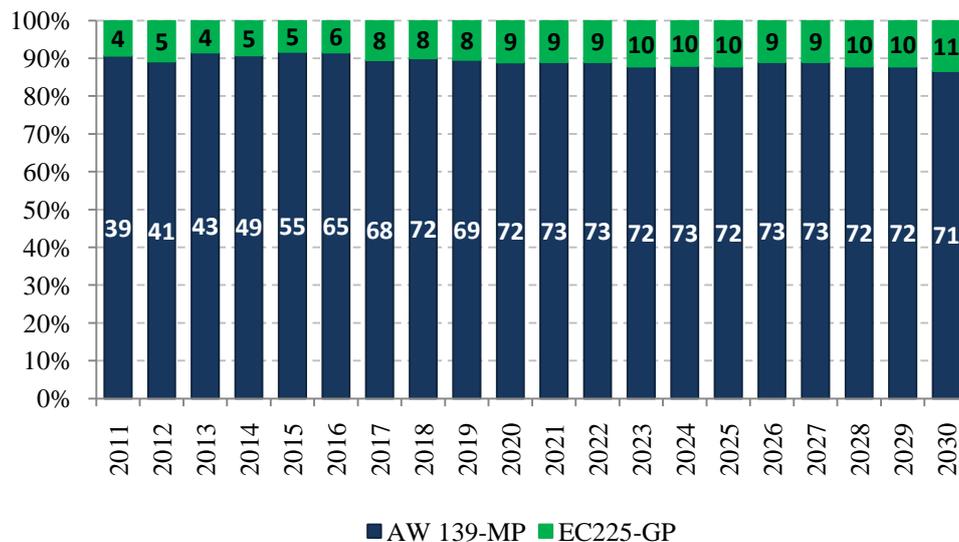


Figura 60: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

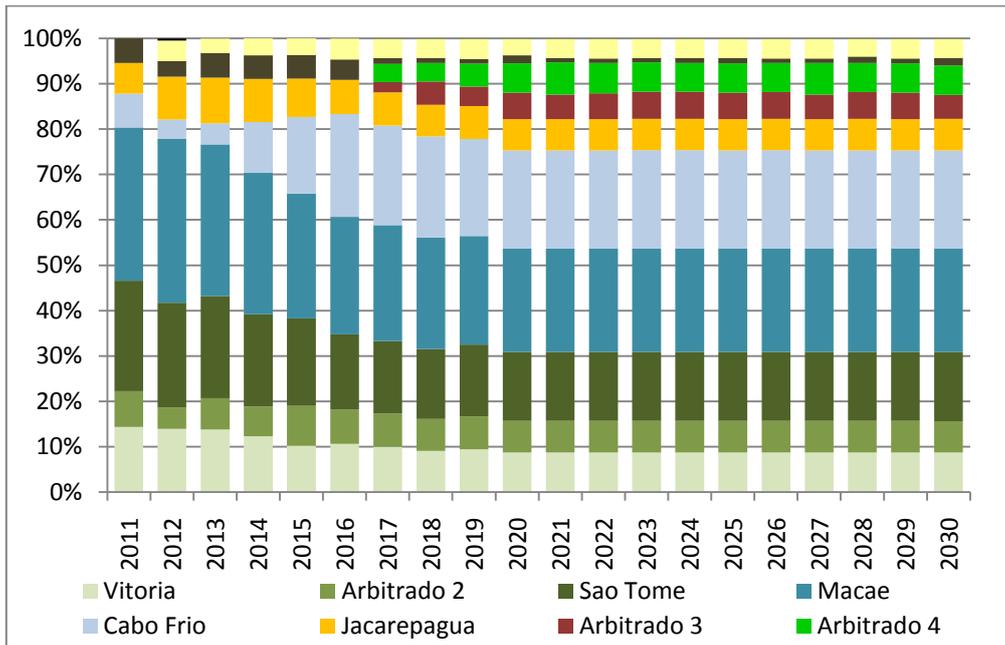


Figura 61: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

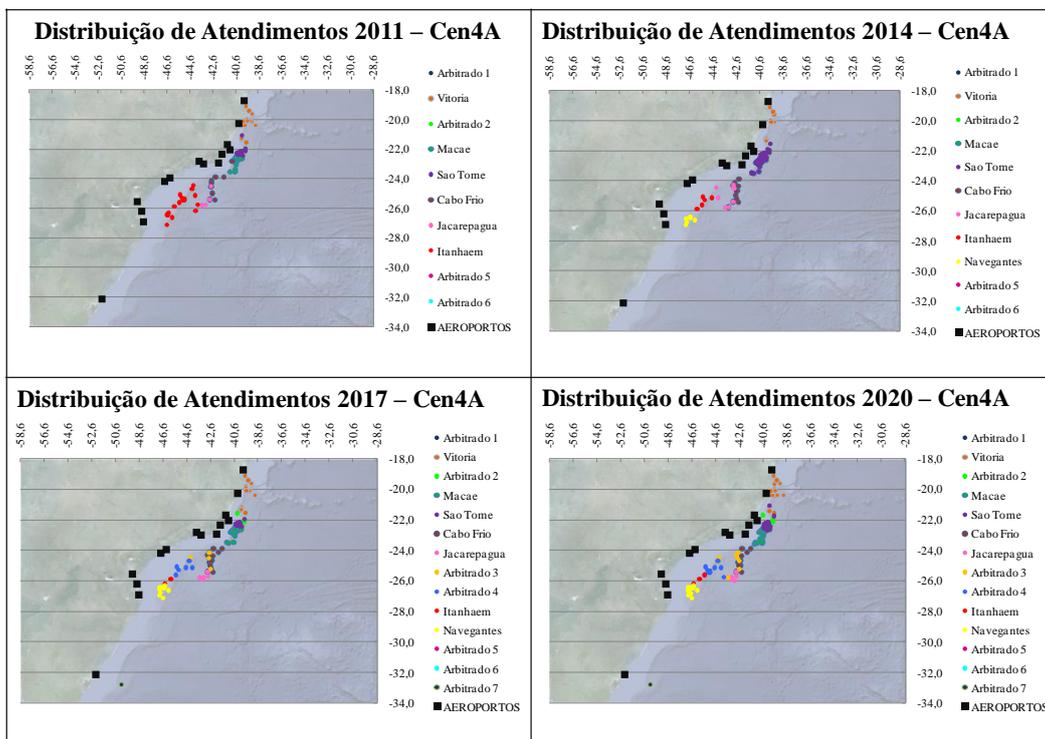


Figura 62: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4A

n) Cenário 4B

Projeção de Frota:

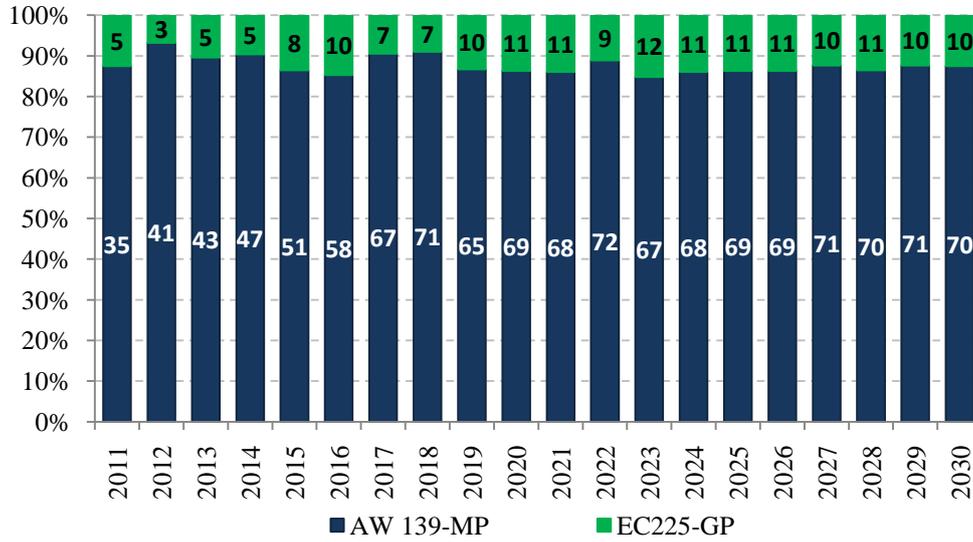


Figura 63: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

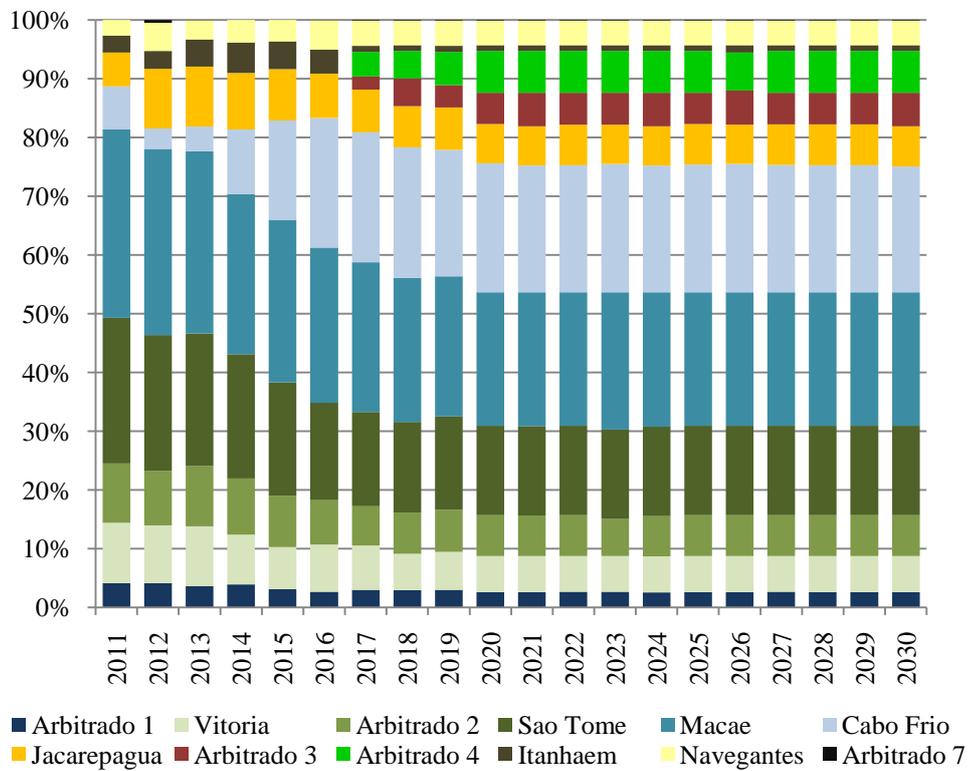


Figura 64: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

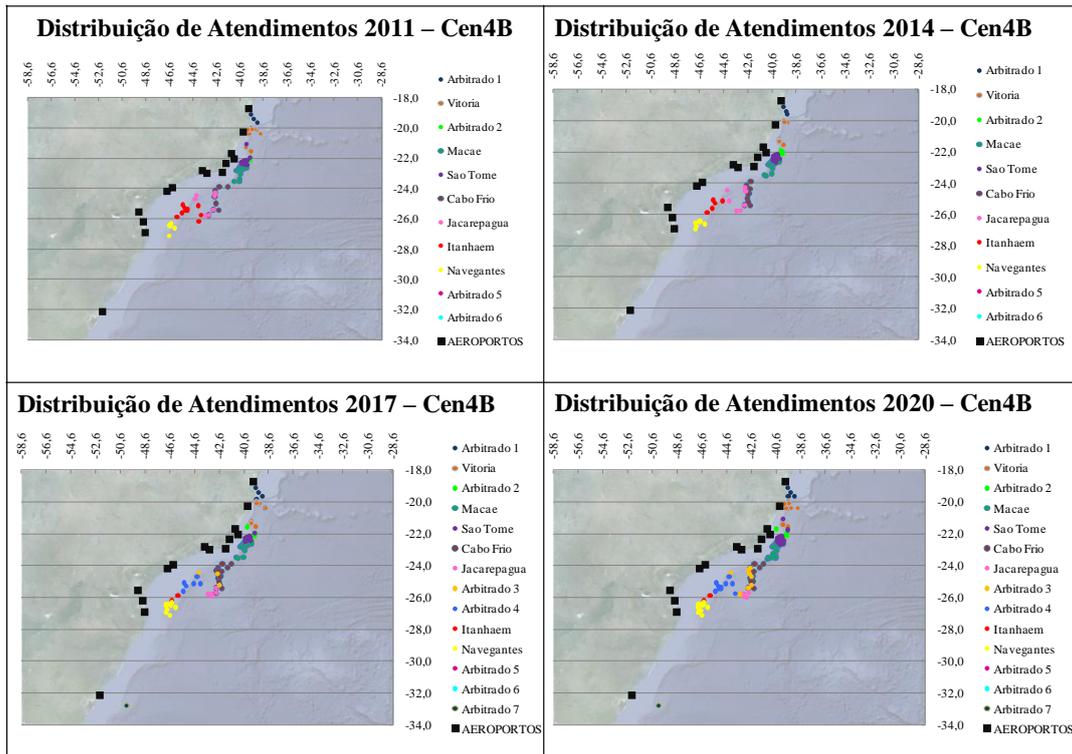


Figura 65: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4B

o) Cenário 4C

Projeção de Frota:

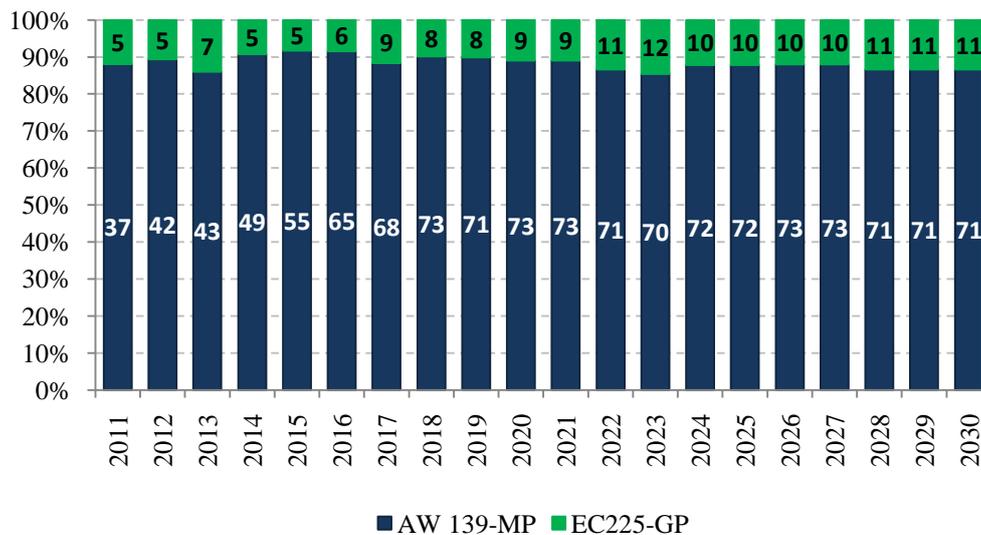


Figura 66: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

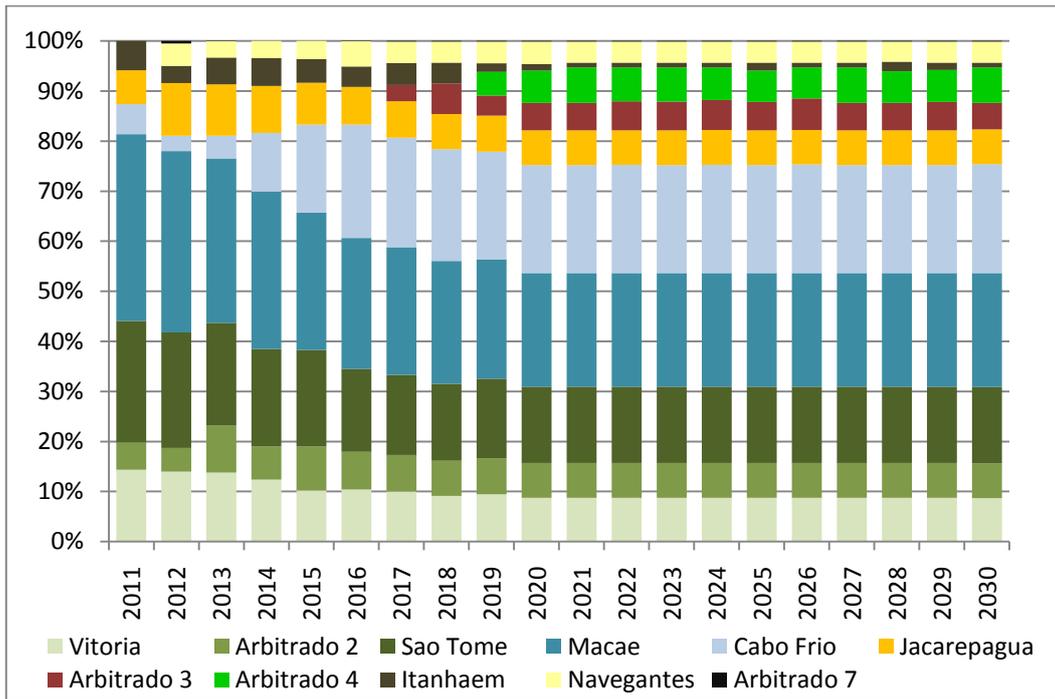


Figura 67: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

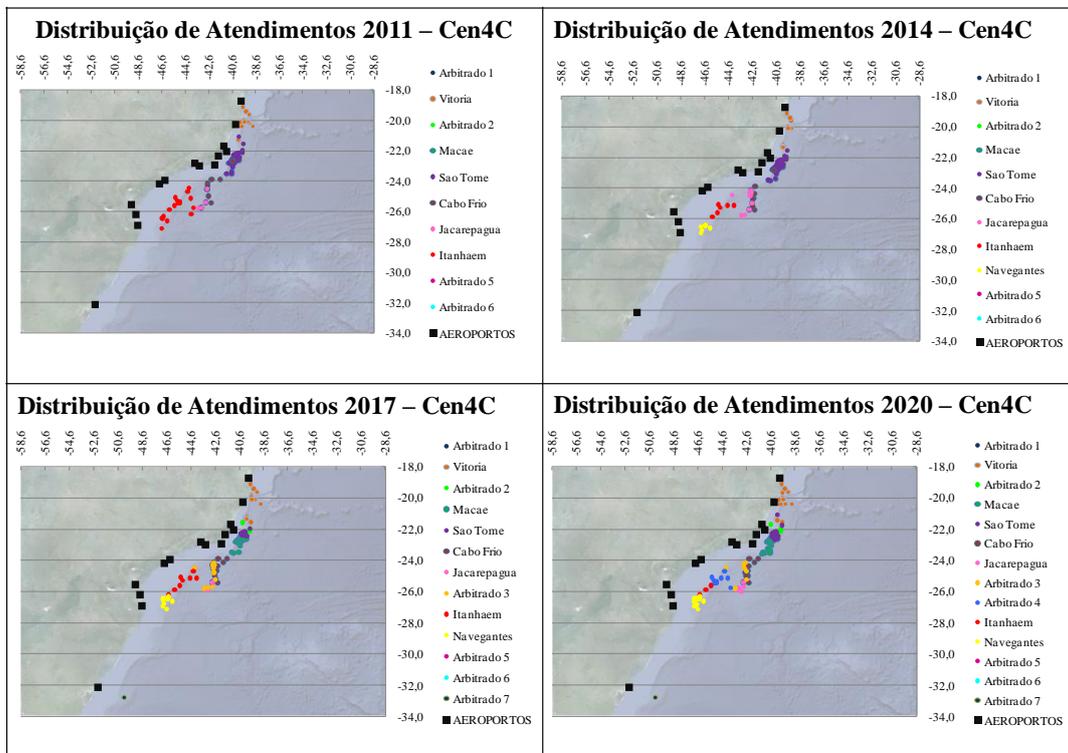


Figura 68: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4C

p) Cenário 4D

Projeção de Frota:

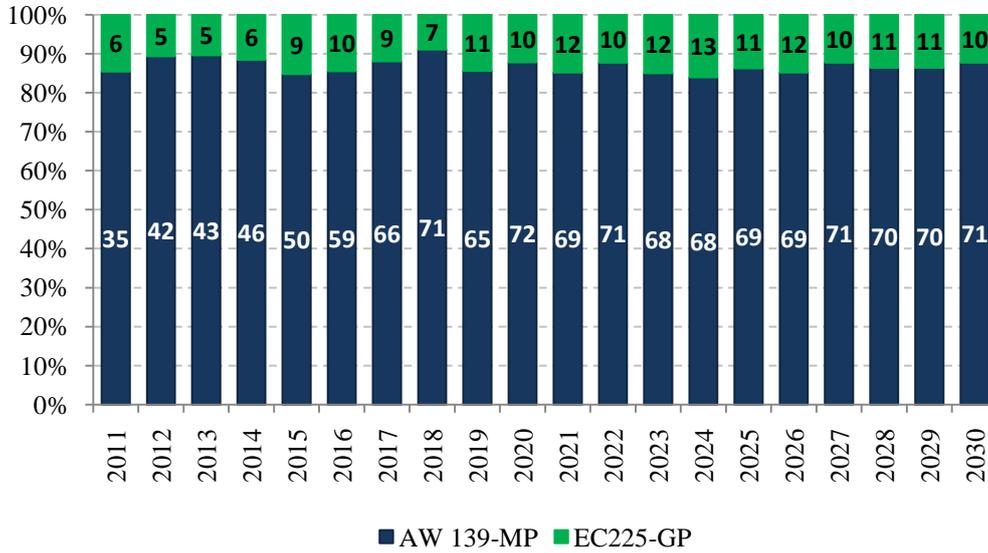


Figura 69: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 4D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

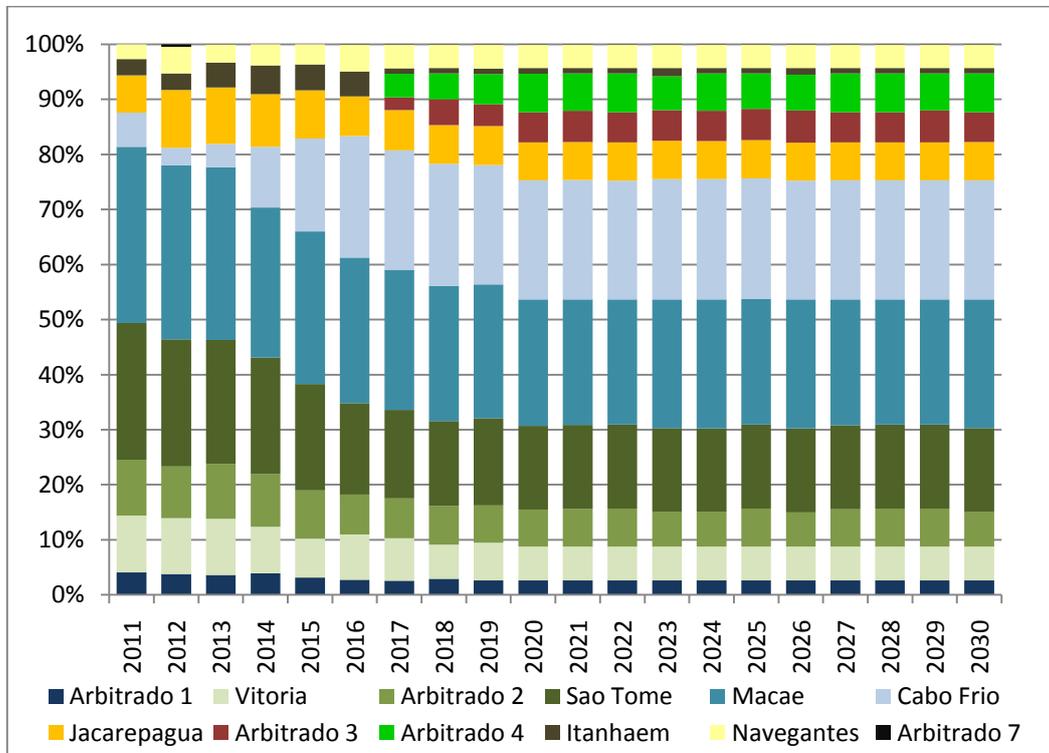


Figura 70: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 4D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

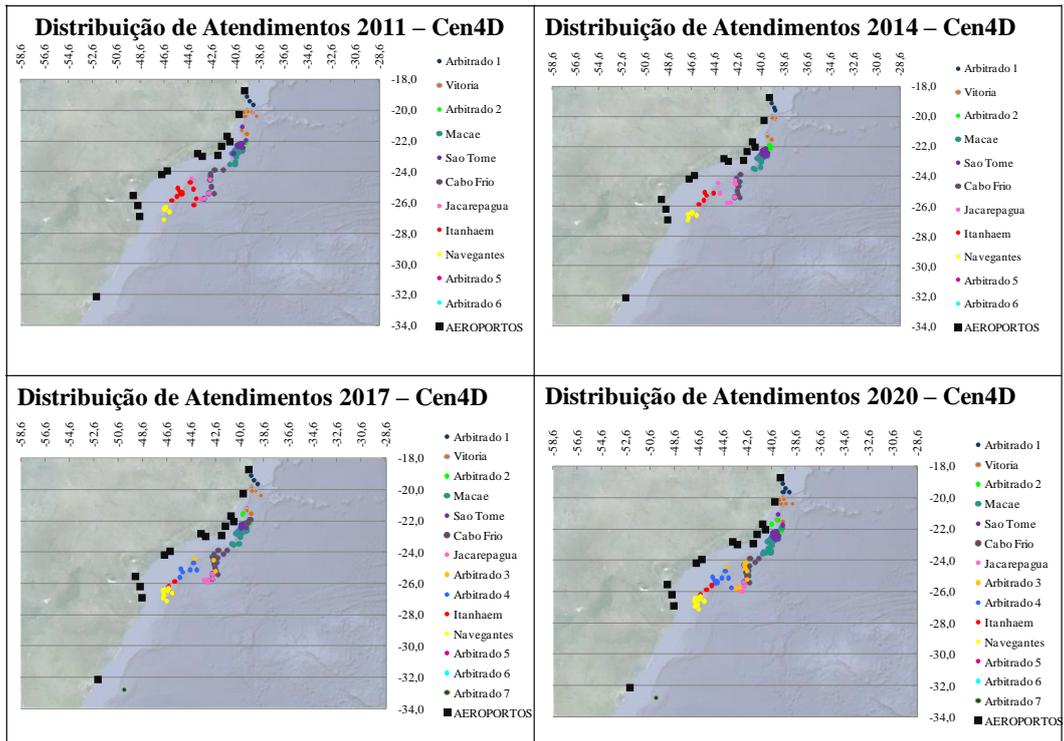


Figura 71: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 4D

q) Cenário 5A

Projeção de Frota:

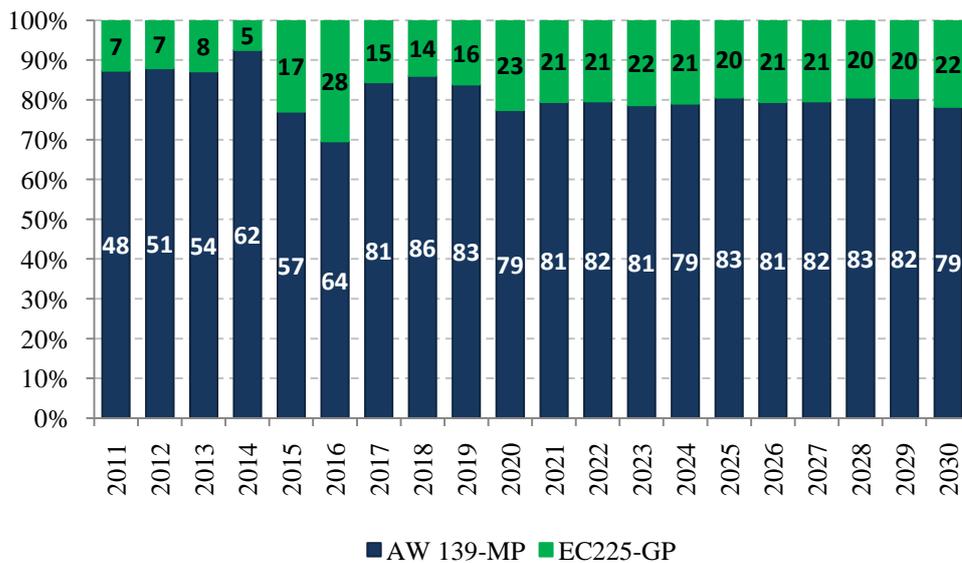


Figura 72: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

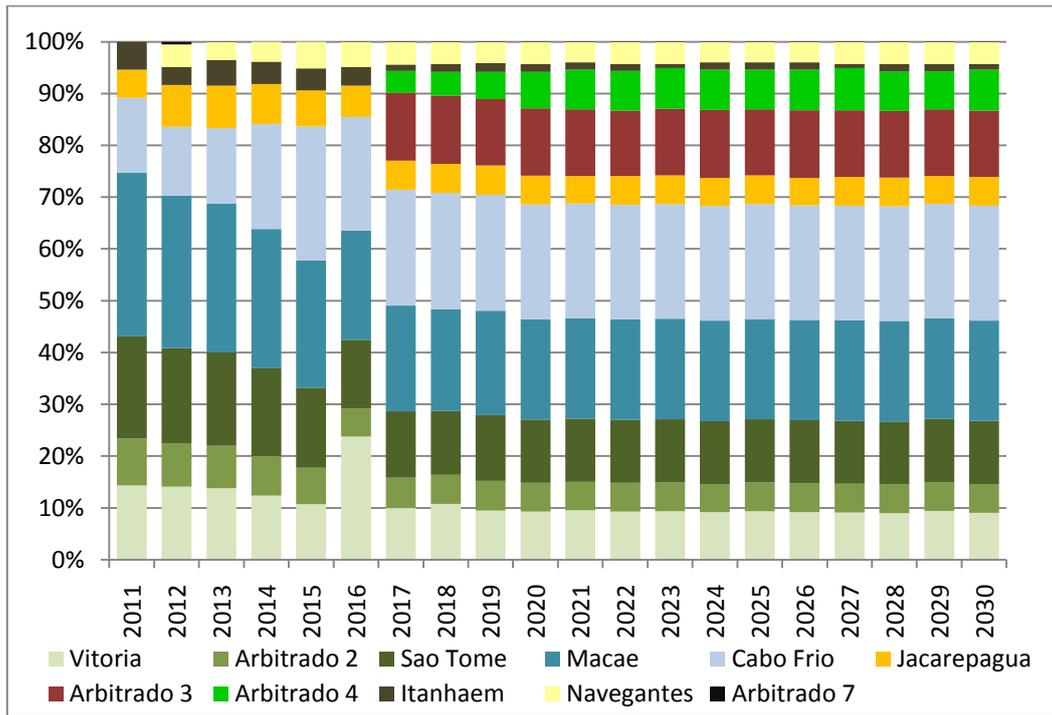


Figura 73: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

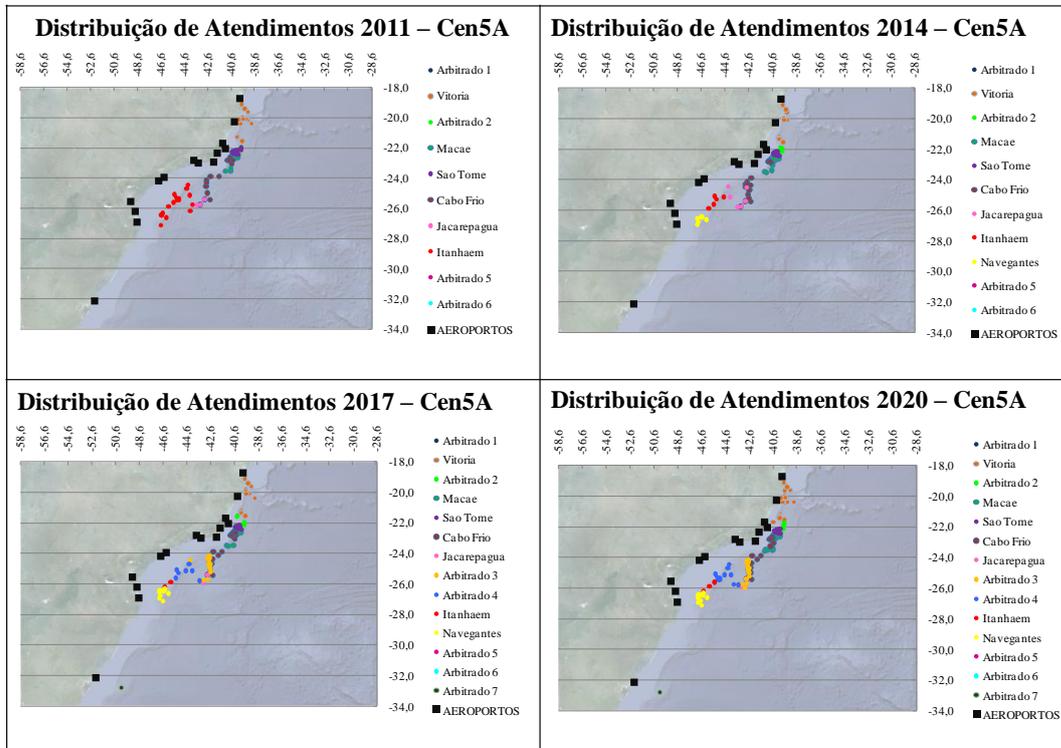


Figura 74: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5A

r) Cenário 5B

Projeção de Frota:

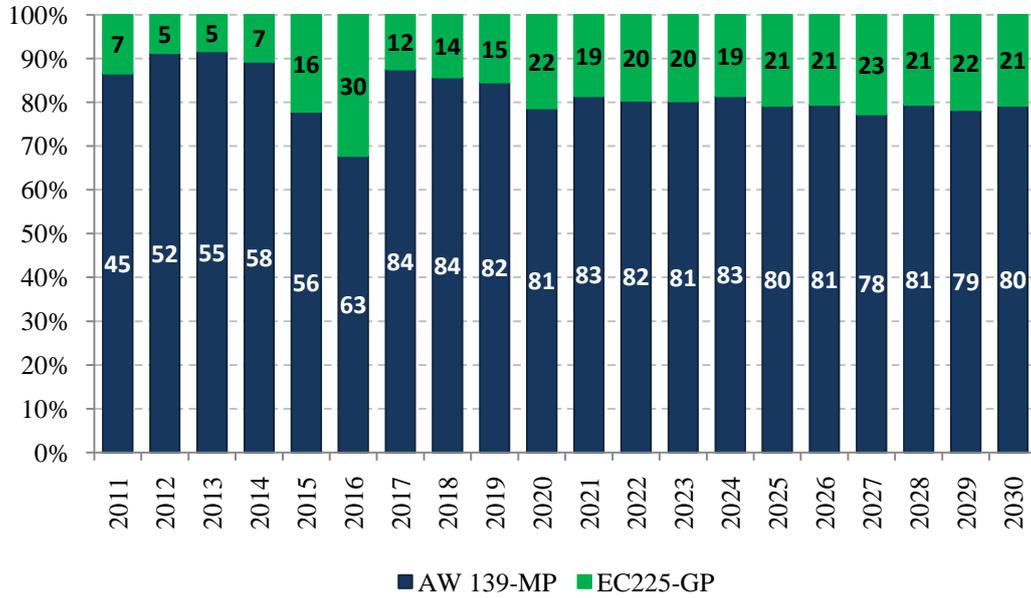


Figura 75: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

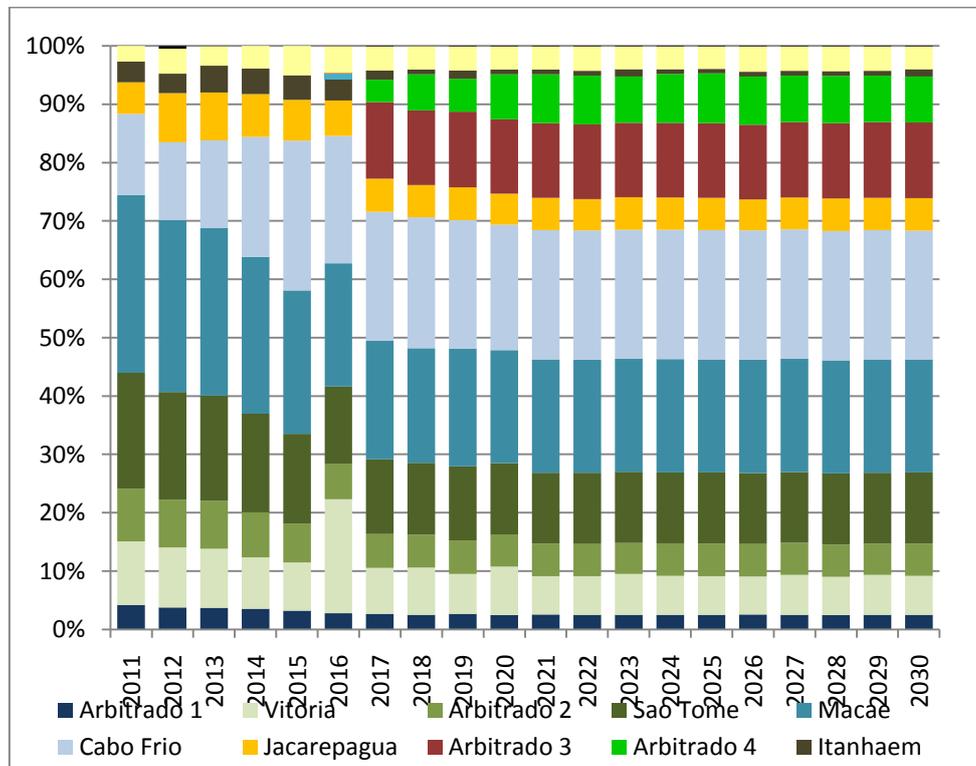


Figura 76: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

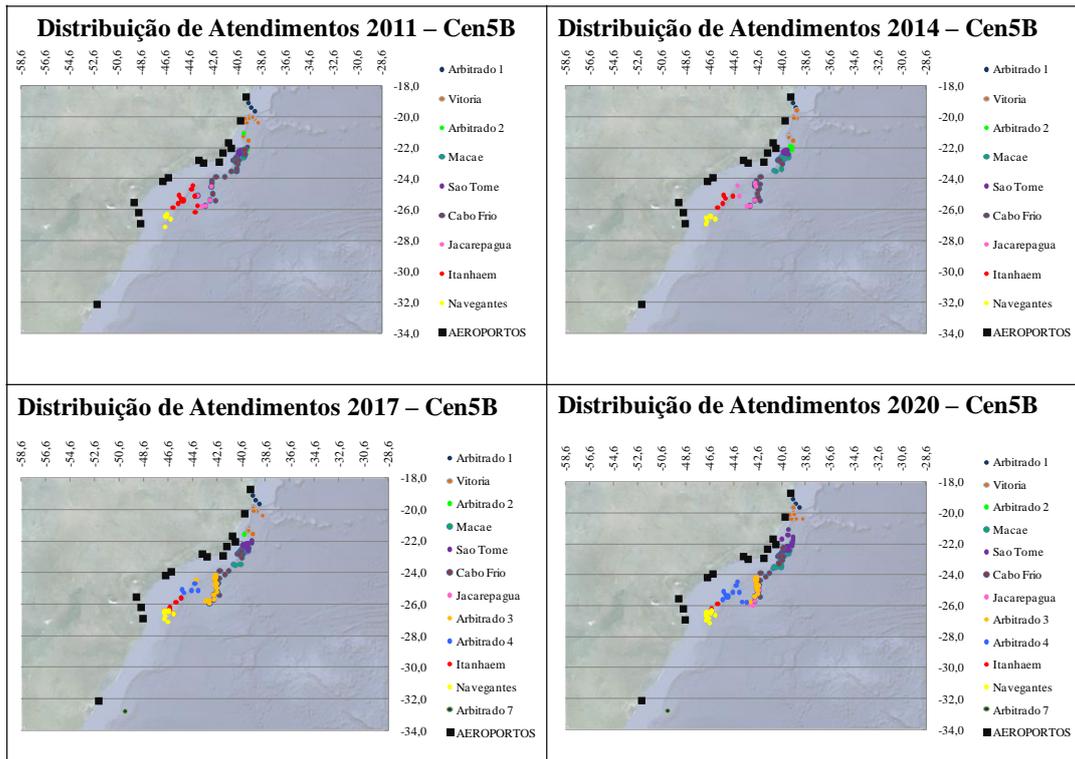


Figura 77: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5B

s) Cenário 5C

Projeção de Frota:

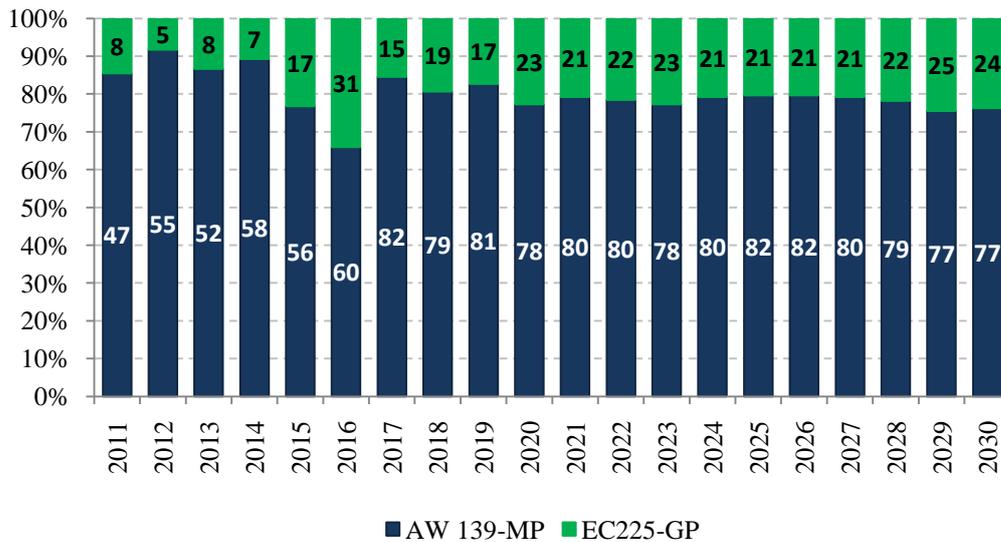


Figura 78: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

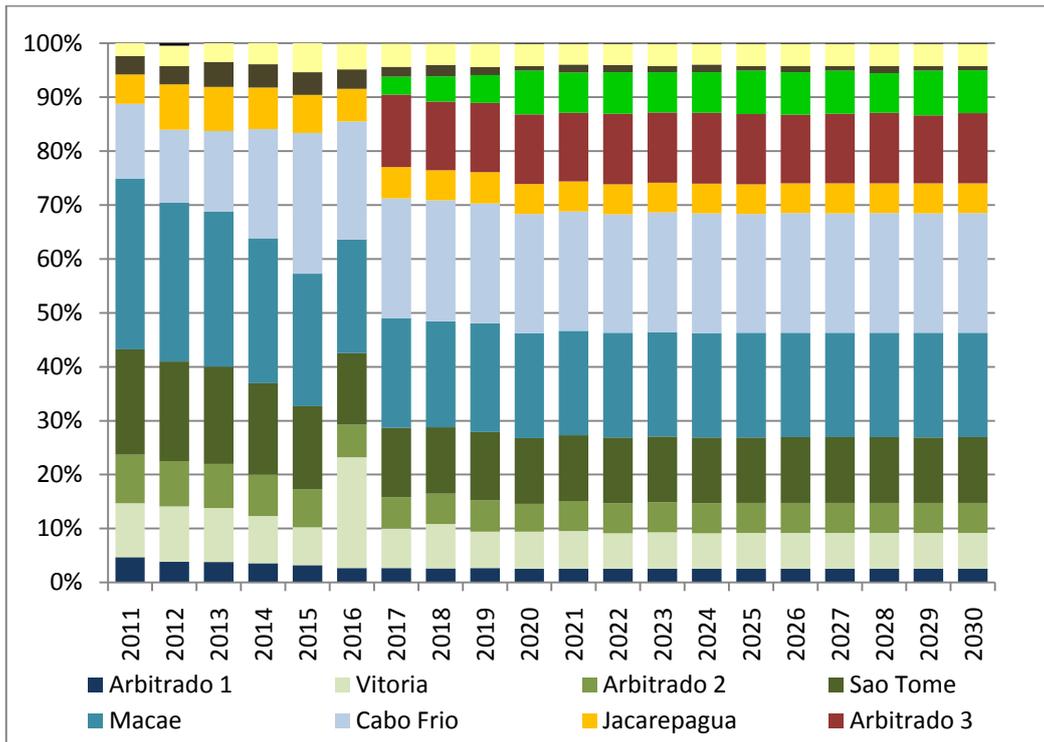


Figura 79: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

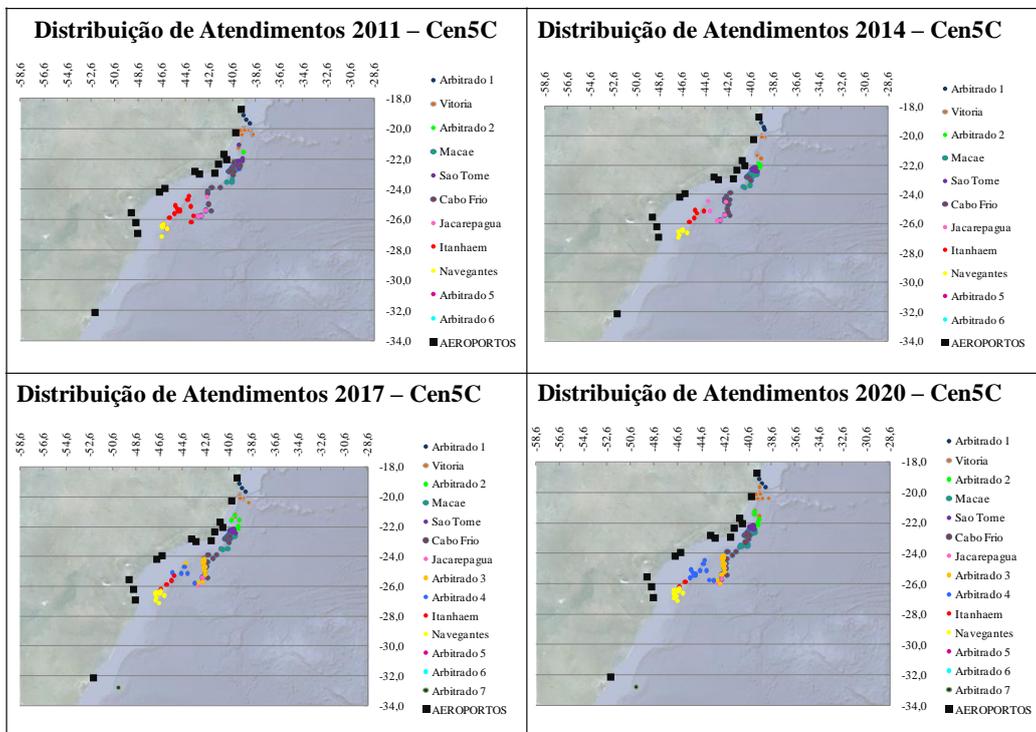


Figura 80: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5C

t) Cenário 5D

Projeção de Frota:

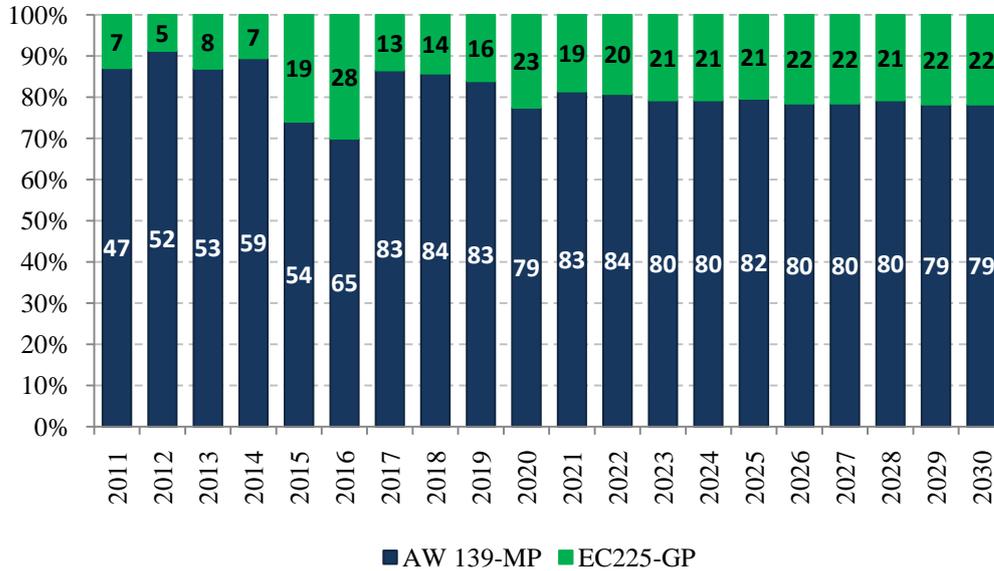


Figura 81: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 5D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

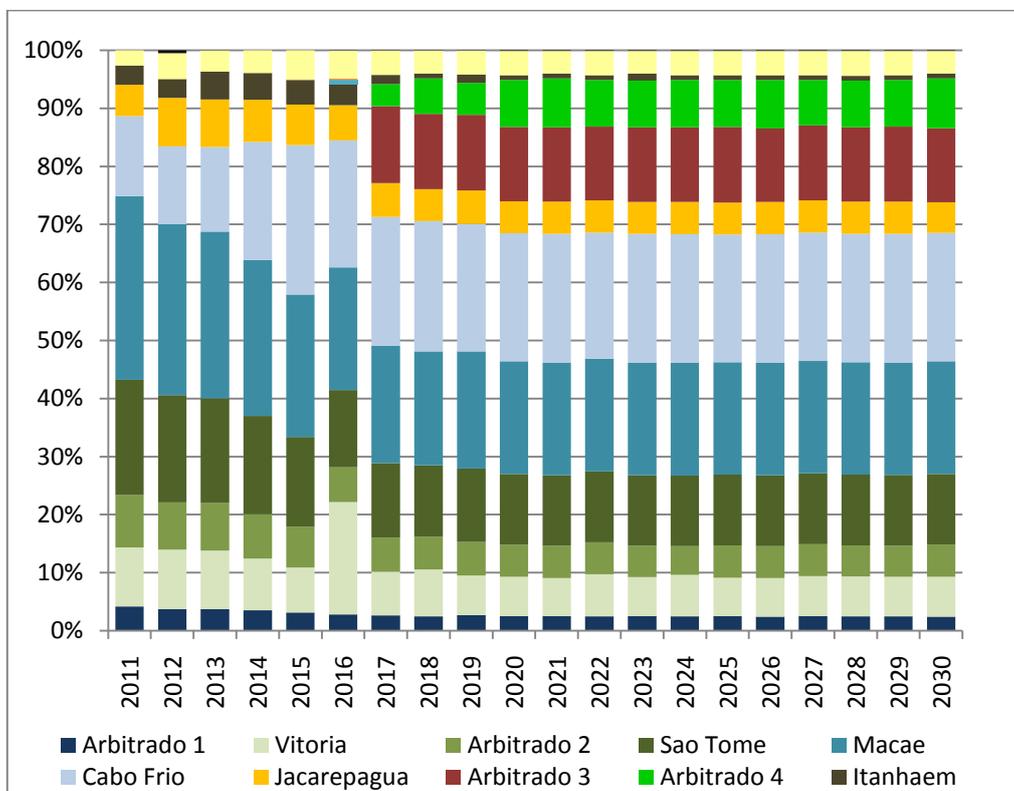


Figura 82: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 5D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

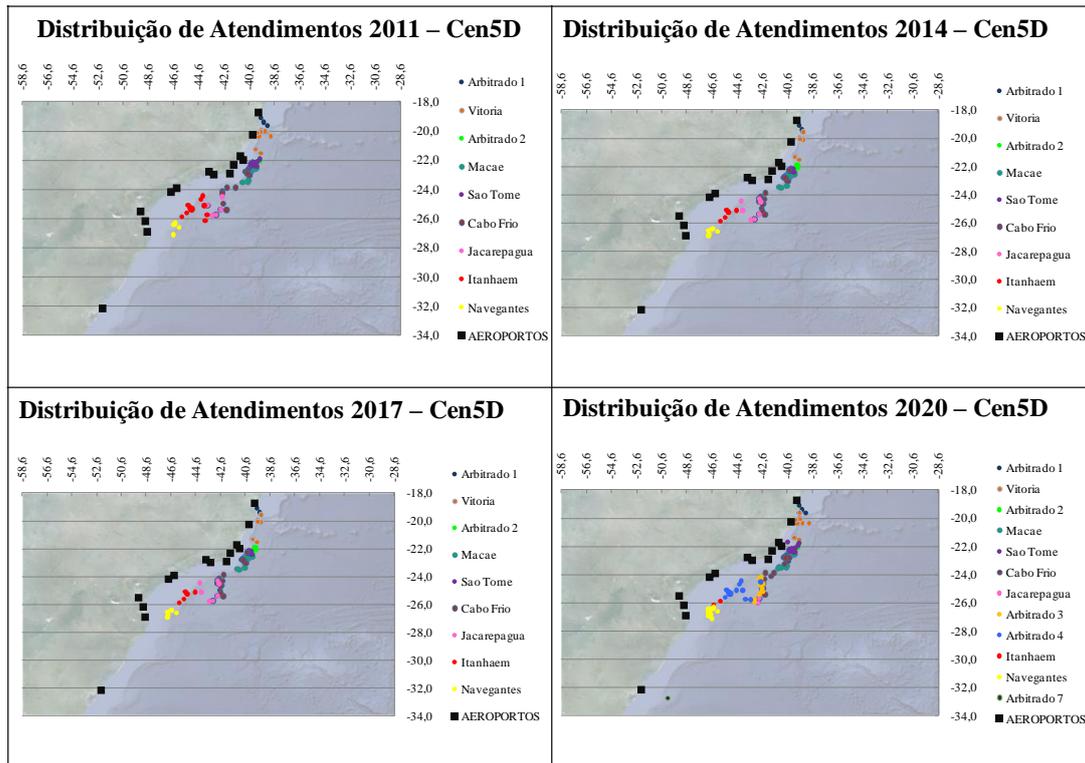


Figura 83: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 5D

u) Cenário 6A

Projeção de Frota:

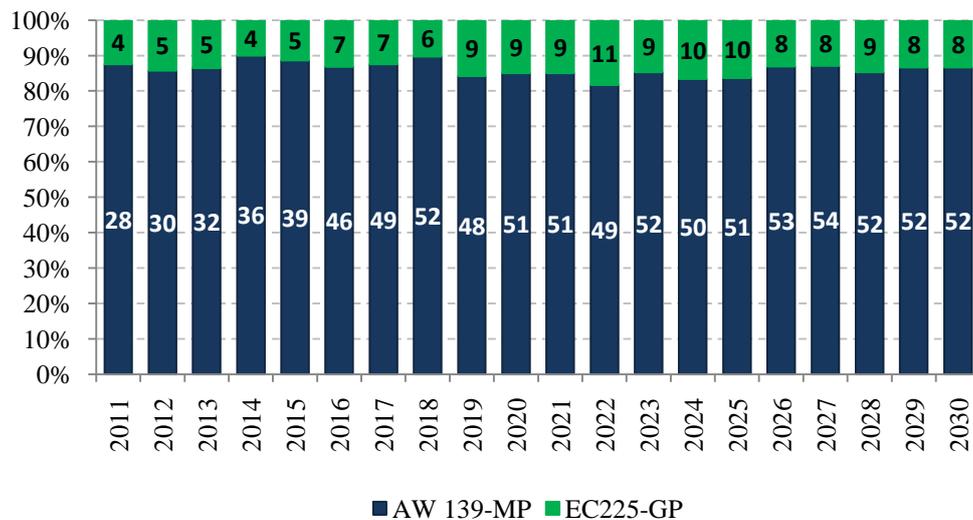


Figura 84: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6A

Distribuição das demandas entre aeródromos:

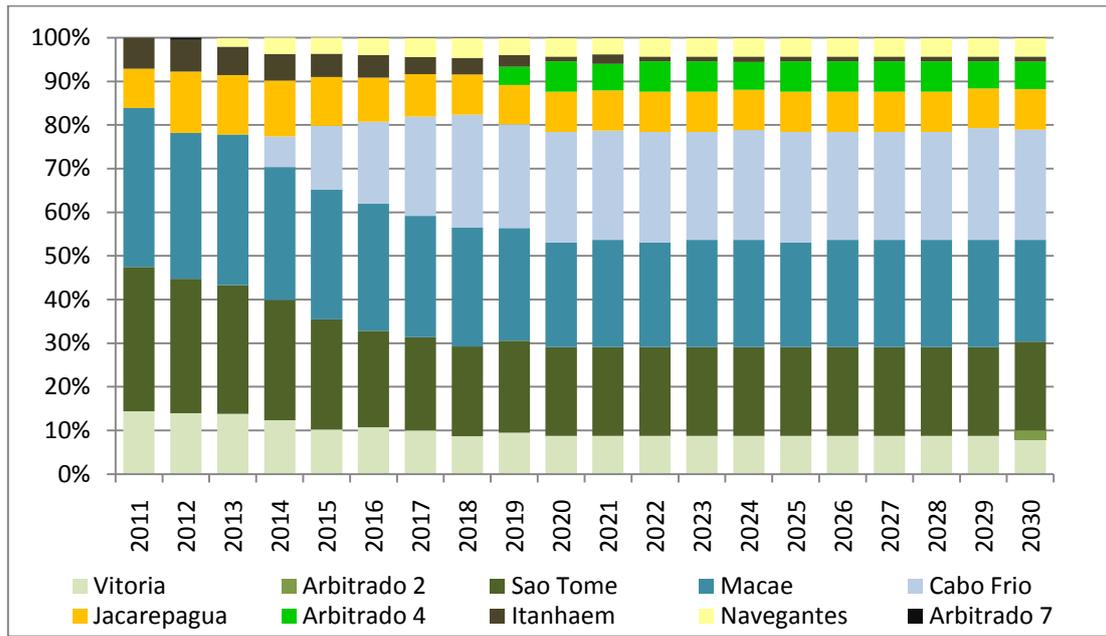


Figura 85: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6A

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

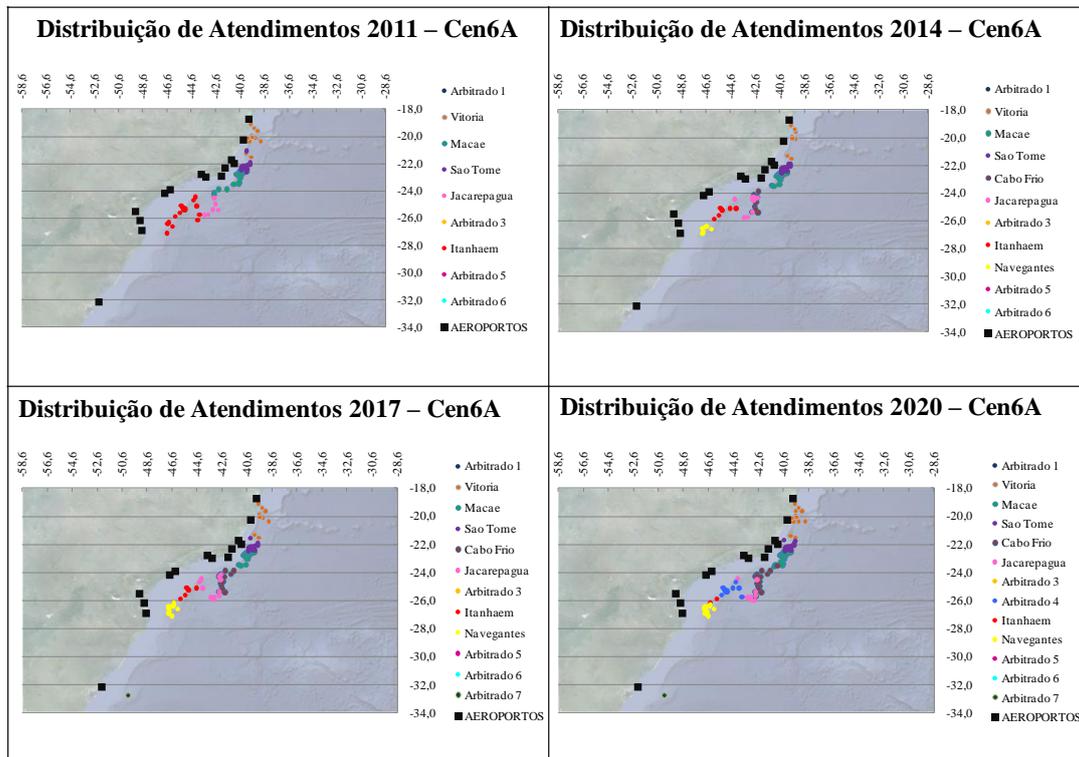


Figura 86: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6A

v) Cenário 6B

Projeção de Frota:

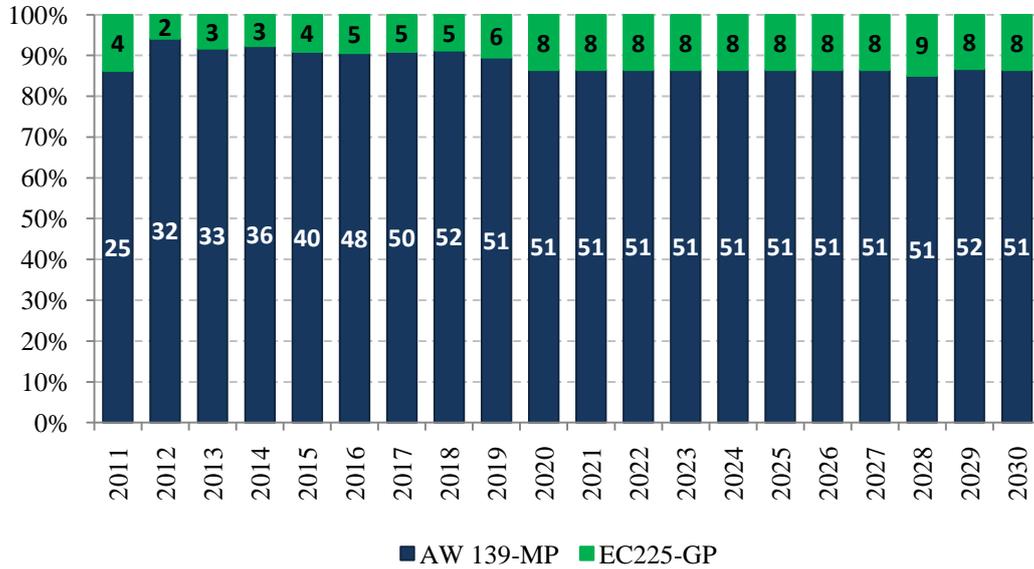


Figura 87: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6B

Distribuição das demandas entre aeródromos:

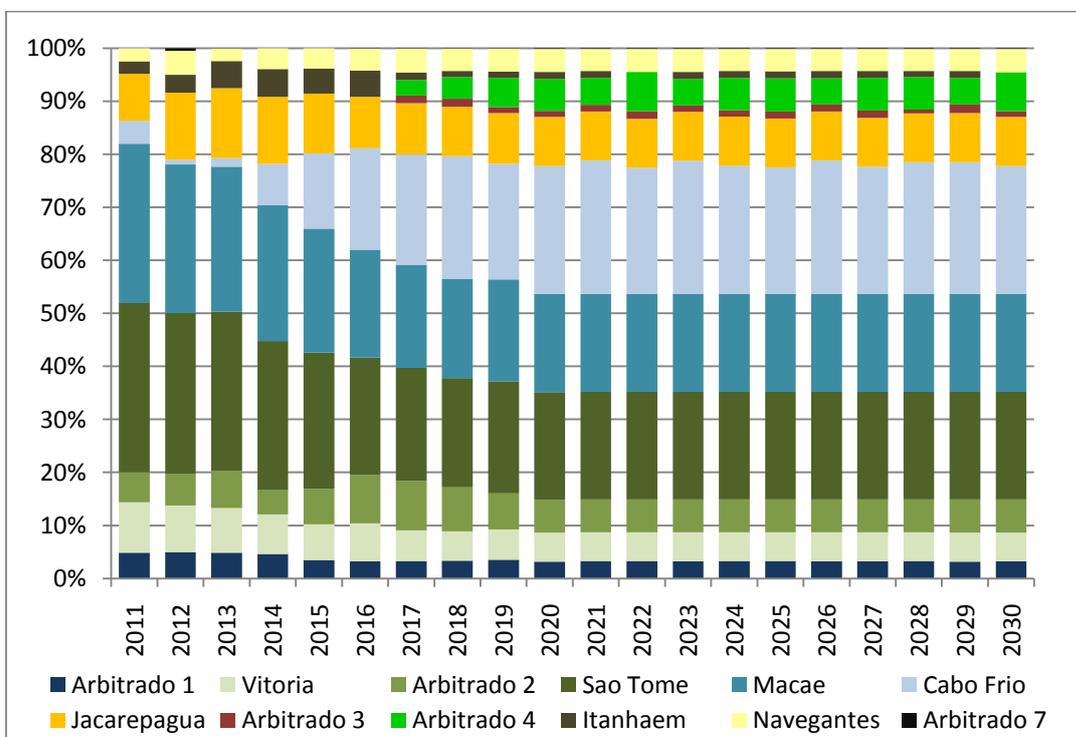


Figura 88: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6B

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

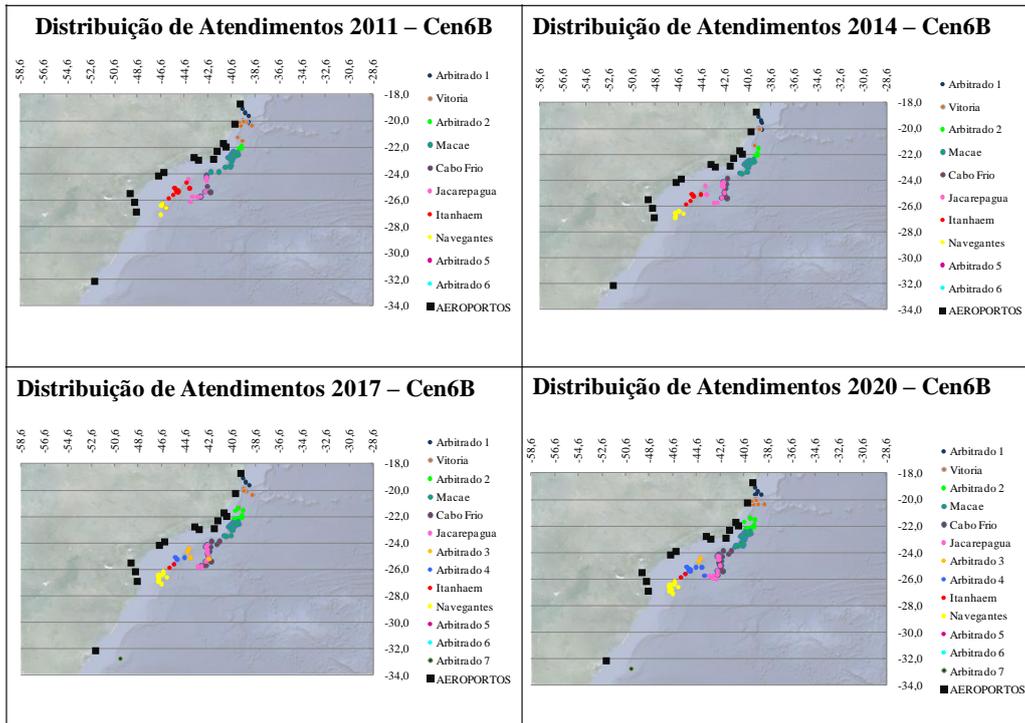


Figura 89: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6B

w) Cenário 6C

Projeção de Frota:

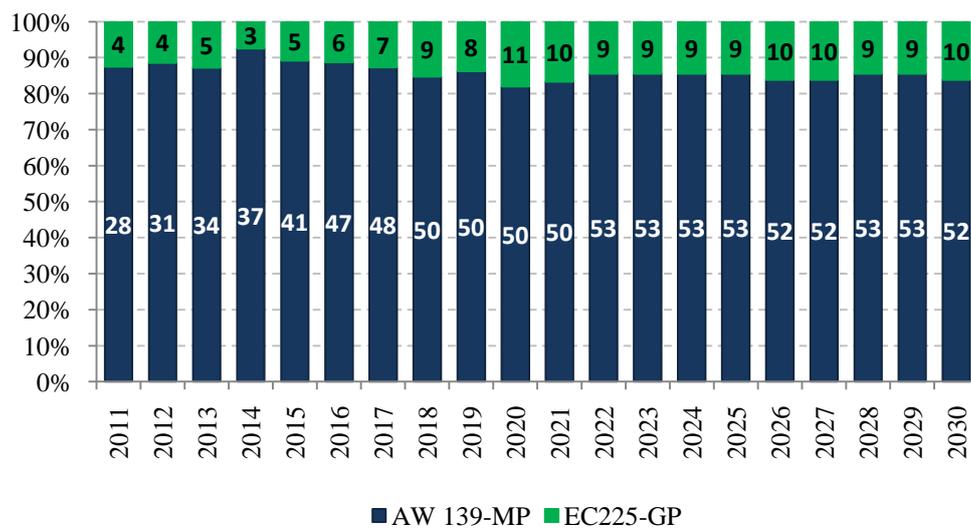


Figura 90: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6C

Distribuição das demandas entre aeródromos:

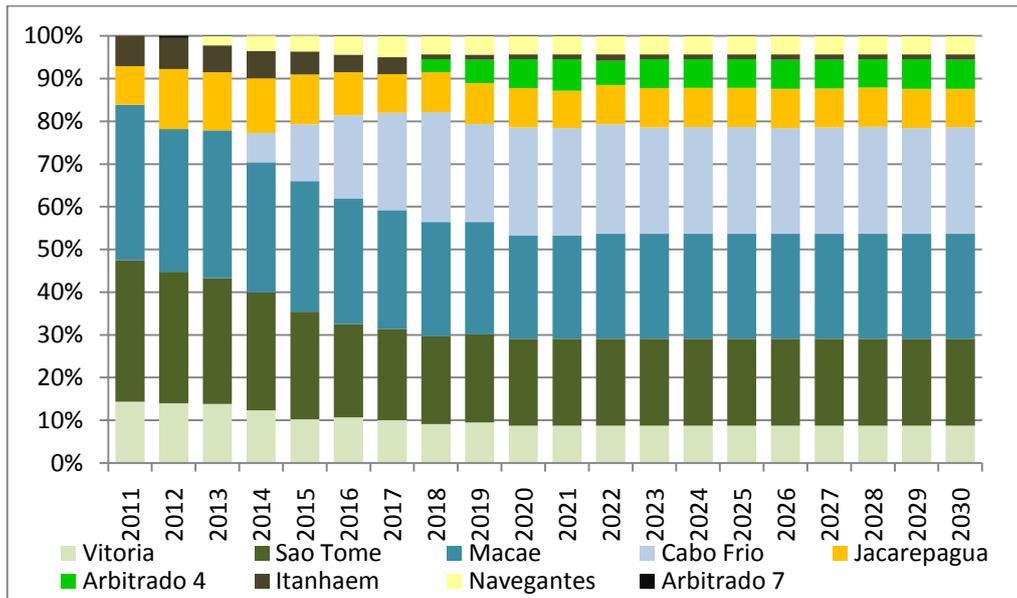


Figura 91: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6C

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

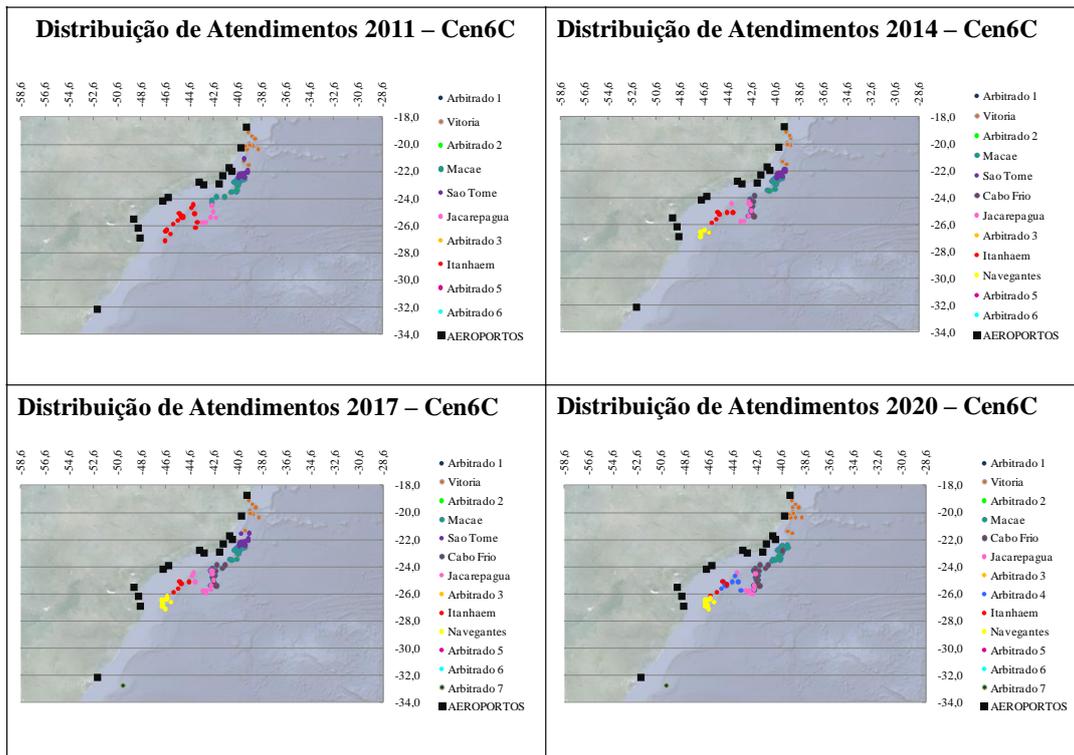


Figura 92: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6C

x) Cenário 6D

Projeção de Frota:

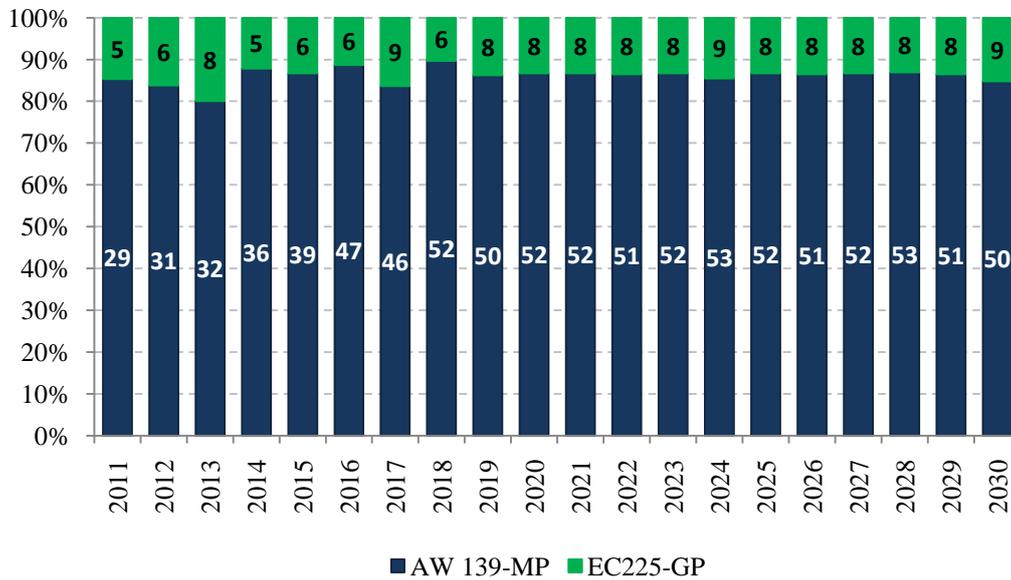


Figura 93: Projeção de frota por tipo de aeronave no Cenário 6D

Distribuição das demandas entre aeródromos:

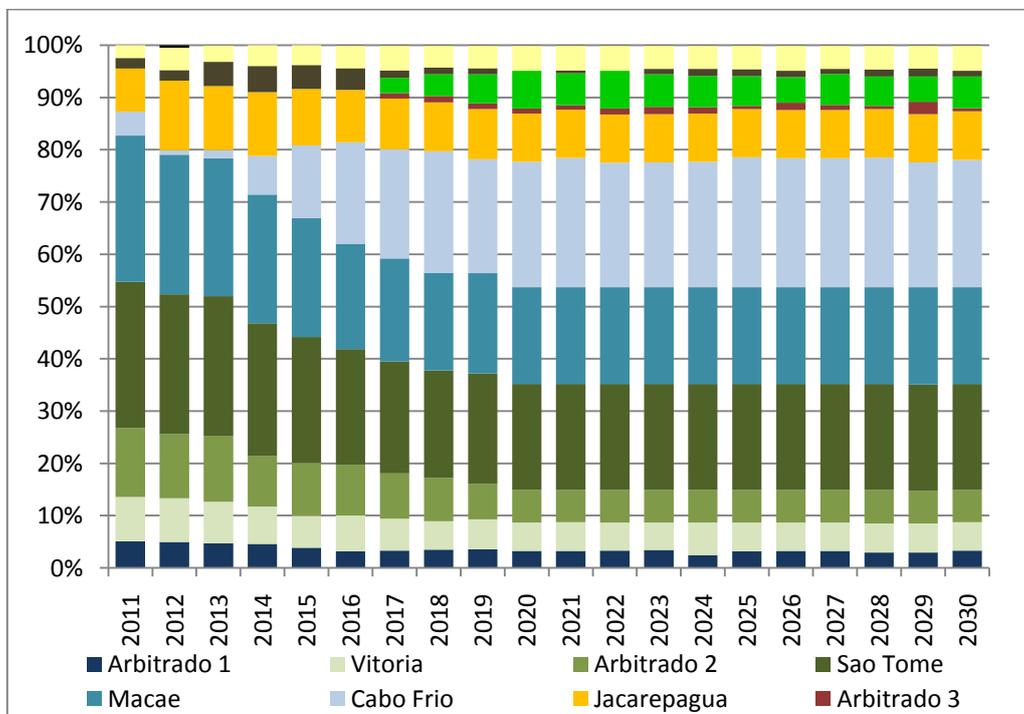


Figura 94: Distribuição da dos passageiros nos aeroportos no Cenário 6D

Alocação de pontos de demanda aos aeródromos:

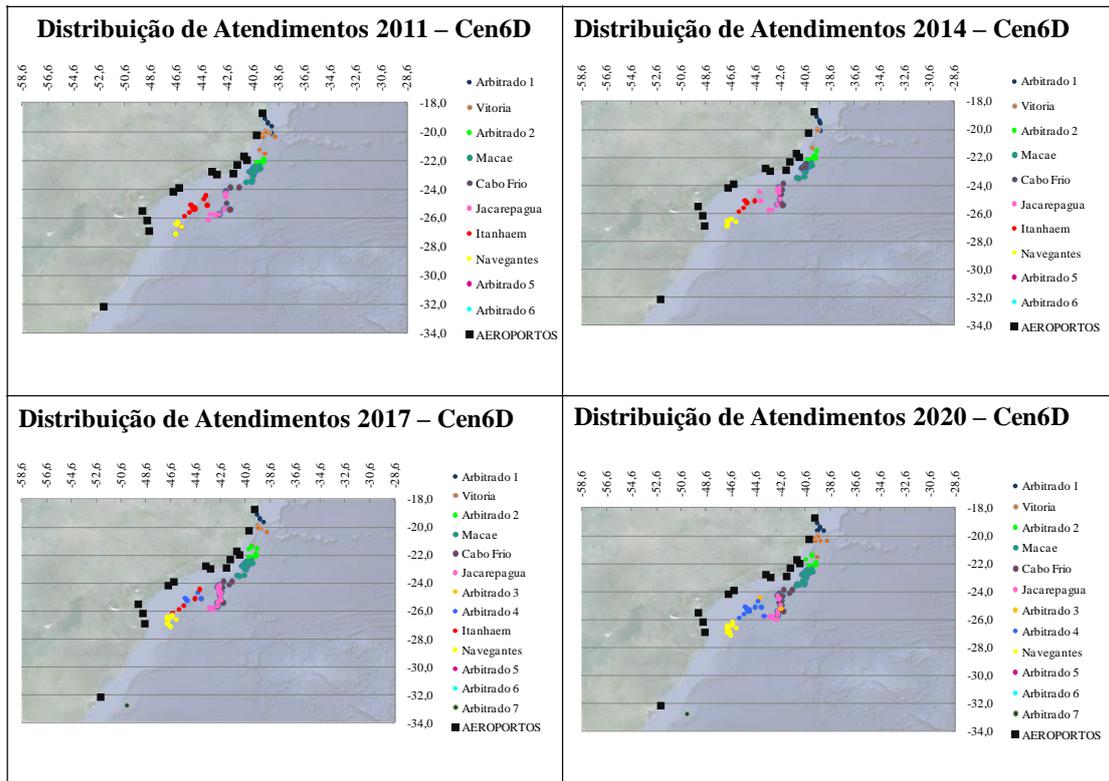


Figura 95: Regiões de Atendimento dos Aeródromos ao Longo do Horizonte de Planejamento para Cenário 6D

ANEXO II – PROGRAMA FONTE

Neste anexo é apresentado o programa fonte na linguagem do AIMMS 3.11.

```
MAIN MODEL Main_Planejamento_de_Rede_Logistica_de_Passageiros
SECTION Inputs
DECLARATION SECTION Entrada_de_Dados
DATABASE TABLE:
  identifier : In_UO
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "Index_UO (u)"
  mapping   : "u" --> u,
              "UO" --> nome_UO( u ) ;
DATABASE TABLE:
  identifier : In_Portal
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "Index_Portais(n)"
  mapping   : "n" --> n,
              "Lat_n" --> lat_n,
              "Long_n" --> long_n,
              "Portal" --> nome_portal,
              "Nome_Tipo" --> nome_tipo_portal ;
DATABASE TABLE:
  identifier : In_Aerodromo
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "Index_Aeroporto (j)"
  mapping   : "j" --> Aerodromo,
              "lat_j" --> lat_j(j),
              "long_j" --> long_j(j),
              "Nome" --> nome_aerodromo( j ),
              "I_F" --> I_F(j),
              "C_O" --> C_O(j) ;
DATABASE TABLE:
  identifier : In_UM
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "aux_Coordenadas_UMs"
  mapping   : "w" --> UM,
              "lat_w" --> lat_w( w ),
              "long_w" --> long_w( w ) ;
DATABASE TABLE:
  identifier : In_Ano
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "Index_Ano (t)"
  mapping   : "t" --> t,
              "Ano" --> nome_ano( t ) ;
DATABASE TABLE:
  identifier : In_Modal
  data source : "Inputs.dsn"
  table name : "Index_Aeronaves (m)"
```

```

mapping : "m"          --> m,
        "Taxa Utilização" --> util(m),
        "Velocidade (nm)" --> vl(m),
        "Nome"          --> nome_modal(m),
        "CF"           --> CF( m ),
        "CV"           --> CV( m ),
        "h"            --> h( m ),
        "t_extra"      --> t_extra( m ),
        "assentos"     --> assentos(m),
        "cm"           --> cm(m),
        "PMD"          --> PMD(m),
        "PBO"          --> PBO(m),
        "Consumo"      --> Consumo(m),
        "TReserva"     --> TReserva(m) ;

```

DATABASE TABLE:

```

identifier : In_Cap_Aerodromo
data source : "Inputs.dsn"
table name : "Aux_CapAeroporto"
mapping : "J_Capacidade_Min" --> Minimo(j,t),
         "j_Capacidade_Max" --> Maximo(j,t),
         "Max_Vagas"        --> Max_Vagas( j, t ) ;

```

DATABASE TABLE:

```

identifier : In_Demanda
data source : "Inputs.dsn"
table name : "Aux_Demanda_Traduzida"
mapping : "Dw" --> q(w,p,t),
         "u"  --> u ;

```

DATABASE TABLE:

```

identifier : In_Produto
data source : "Inputs.dsn"
table name : "Index_Produtos (p)"
mapping : "p" --> p,
         "Nome_Produto" --> nome_produto(p) ;

```

DATABASE TABLE:

```

identifier : In_Nome_UM
data source : "Inputs.dsn"
table name : "Index_Unidades marítimas (w)"
mapping : "UM" --> nome_UM(w),
         "Indica_UM_Portal" --> Indica_UM_Portal(w),
         "R_Heliponto" --> R_Heliponto( w ) ;

```

DATABASE TABLE:

```

identifier : In_Matriz_nw
data source : "Inputs.dsn"
table name : "Matriz_nw"
mapping : "w" --> w,
         "n" --> n,
         "Associação" --> Escolha_UM_Portal ;

```

ENDSECTION ;

ENDSECTION Inputs ;

SECTION Modelo

DECLARATION SECTION Constantes

PARAMETER:

identifier : Raio_da_terra
text : "Raio da Terra em quilômetros."
definition : 6378 ;

PARAMETER:

identifier : Conversao_KM_Milha
definition : 1.852 ;

PARAMETER:

identifier : Ppax
text : "Peso médio do passageiro juntamente com sua bagagem"
definition : 107 ;

PARAMETER:

identifier : BigM ;

PARAMETER:

identifier : lim
text : "Quantidade máxima de aeródromos abertos."
definition : 14 ;

ENDSECTION ;

DECLARATION SECTION Entidades

SET:

identifier : Portal
index : n ;

SET:

identifier : UO
index : u ;

SET:

identifier : UM
text : "Conjunto de Unidades Marítimas"
index : w ;

SET:

identifier : Aerodromo
text : "Conjunto de possíveis aeródromos"
index : j ;

SET:

identifier : Ano
text : "Conjunto de anos de análise"
indices : t, t2 ;

SET:

identifier : TipoPax
text : "Conjunto de Produtos"
index : p ;

SET:

identifier : Modal
text : "Conjunto de modais (Modelos de helicóptero)"
index : m ;

ENDSECTION ;

DECLARATION SECTION Parametros_de_Entrada

STRING PARAMETER:

identifier : nome_portal

index domain : (n) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_tipo_portal
 index domain : n ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_UO
 index domain : (u) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_aerodromo
 index domain : (j) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_UM
 index domain : (w) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_produto
 index domain : (p) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_modal
 index domain : (m) ;
STRING PARAMETER:
 identifier : nome_ano
 index domain : t ;
PARAMETER:
 identifier : lat_w
 index domain : w
 text : "Latitude da unidade marítima "
 range : free ;
PARAMETER:
 identifier : long_w
 index domain : w
 text : "Longitude da unidade marítima"
 range : free ;
PARAMETER:
 identifier : long_j
 index domain : j
 text : "Longitude do aeródromo j"
 range : free ;
PARAMETER:
 identifier : lat_j
 index domain : j
 text : "Latitude do aeródromo j"
 range : free ;
PARAMETER:
 identifier : lat_n
 index domain : n ;
PARAMETER:
 identifier : long_n
 index domain : (n) ;
PARAMETER:
 identifier : util

index domain : (m)
 text : "Taxa de utilização dos assentos do modal m por viagem"
 range : [0, 1] ;
PARAMETER:
 identifier : CF
 index domain : (m)
 text : "Custo Fixo Anual por modal" ;
PARAMETER:
 identifier : vl
 index domain : (m)
 text : "Velocidade de cruzeiro do modal m. Foi considerado valor menor que a velocidade de cruzeiro para representar os tempos perdidos com pouso e decolagem." ;
PARAMETER:
 identifier : h
 index domain : (m)
 text : "Limite de horas voadas no ano por aeronave. Para representar o limite mensal de horas voadas presentes nos contratos de aeronaves." ;
PARAMETER:
 identifier : q
 index domain : (w,p,t)
 text : "Quantidade de passageiros por tipo (p a serem transportados para a unidade marítima w no ano t." ;
PARAMETER:
 identifier : Maximo
 index domain : (j,t)
 text : "Capacidade máxima de movimentação de passageiros no aeródromo j no ano t." ;
PARAMETER:
 identifier : Minimo
 index domain : (j,t)
 text : "Capacidade Mínima de Movimentação no Aeródromo j no ano t." ;
PARAMETER:
 identifier : CV
 index domain : (m)
 text : "Custo Variável Anual por modal" ;
PARAMETER:
 identifier : aut
 index domain : (m)
 text : "Autonomia máxima, em quilômetros do modelo de aeronave m." ;
PARAMETER:
 identifier : t_extra
 index domain : (m)
 text : "Tempo parado, em horas, em cada UM em cada visita para embarque ou desembarque de passageiros, por modal." ;
PARAMETER:
 identifier : Indica_UM_Portal
 index domain : w ;
PARAMETER:
 identifier : Escolha_UM_Portal

index domain : (w,n) ;
PARAMETER:
 identifier : Max_Vagas
 index domain : (j,t)
 range : integer ;
PARAMETER:
 identifier : R_Heliponto
 index domain : (w)
 range : binary ;
PARAMETER:
 identifier : I_F
 index domain : (j)
 text : "Parcela fixa do investimento na abertura do aeródromo j." ;
PARAMETER:
 identifier : C_O
 index domain : (j) ;
PARAMETER:
 identifier : assentos
 index domain : (m)
 text : "Quantidade de assentos disponíveis para utilização em uma perna do voo pelo modal m." ;
PARAMETER:
 identifier : cm
 index domain : (m)
 text : "Capacidade do Tanque de combustível do modal m em kg. O dimensionamento é realizado sem consideração de tanque extra por simplificação. O quantidade de aeronaves com tanque extra na frota não é significativa (XX %)." ;
PARAMETER:
 identifier : PMD
 index domain : (m)
 text : "Peso Máximo de Decolagem do modal m em kg. Representa o peso máximo que a aeronave pode apresentar, juntamente com combustível e passageiros para que consiga decolar. Além da restrição de fabricação da aeronave este pode representar uma restrição da estrutura do heliponto da plataforma. A parte da plataforma não será representada no modelo pois esta considerada através da restrição de tipo de modal que cada plataforma recebe (MP ou GP)" ;
PARAMETER:
 identifier : PBO
 index domain : (m)
 text : "consumo do modal m em sua velocidade de cruzeiro considerada." ;
PARAMETER:
 identifier : Consumo
 index domain : (m)
 text : "Consumo de combustível em kg/hora" ;
PARAMETER:
 identifier : TReserva
 index domain : (m)
 text : "Tempo médio de voo para o qual a aeronave deve possuir combustível, sobressalente, seguindo as normas de segurança e considerando que os vôos são todos IFR." ;

```

ENDSECTION ;
DECLARATION SECTION Parametros_calculados
PARAMETER:
  identifier : IndicaAerodromoAberto
  index domain : (j)
  definition : if sum[t,y(j,t)]>0 then 1 else 0 endif ;
PARAMETER:
  identifier : d
  index domain : (j,w)
  text      : "Distância entre o aeródromo j e a unidade marítima w. Fórmula
considerando a curvatura da Terra."
  range     : nonnegative
  definition (1 - Indica_UM_Portal(w)) * 2 * Raio_da_Terra * ArcCos( cos(
Radians( (long_j(j) - long_w(w) ))) * Cos( Radians(lat_j(j))) * Cos(
Radians(lat_w(w))) + Sin(Radians(lat_j(j))) * Sin(Radians(lat_w(w))) ) +
Indica_UM_Portal(w) * d_jnw(j,w) ;
PARAMETER:
  identifier : d_nw
  index domain : (w)
  text      : "Distância entre o portal n e a unidade marítima w. Fórmula
considerando a curvatura da Terra."
  range     : nonnegative
  definition : sum[ n, Escolha_UM_Portal(w,n) * Raio_da_Terra * ArcCos(
cos(Radians( (long_n(n) - long_w(w)))) * Cos( Radians(lat_n(n))) * Cos(Radians(
lat_w(w))) + Sin(Radians( lat_n(n))) * Sin(Radians( lat_w(w))))]
  comment   : "Na distância aeródromo-UM, multiplica-se por 2 pois a aeronave
fará o ciclo completo. Neste caso, a aeronave ira por um portal e retornará por outro e
esta distância será somada posteriormente." ;
PARAMETER:
  identifier : d_jn
  index domain : (j,w)
  range     : nonnegative
  definition : sum[ n, Escolha_UM_Portal(w,n) * Raio_da_Terra * ArcCos( cos(
Radians((long_n(n) - long_j(j)))) * Cos( Radians(lat_n(n))) * Cos( Radians(lat_j(j))) +
Sin( Radians(lat_n(n))) * Sin( Radians(lat_j(j))))]
  comment   : "Na distância aeródromo-UM, multiplica-se por 2 pois a aeronave
fará o ciclo completo. Neste caso, a aeronave ira por um portal e retornará por outro e
esta distância será somada posteriormente." ;
PARAMETER:
  identifier : d_jnw
  index domain : (j,w)
  definition : d_jn(j,w)+d_nw(w) ;
PARAMETER:
  identifier : NV
  index domain : (j,w,p,m,t)
  text      : "Número de viagens possíveis para atendimento da demanda de w no
ano t pelo modal m partindo do aeroporto j."
  definition : (h(m)*12)/(d(j,w)/(vl(m)*Conversao_KM_Milha)+ t_extra(m)/60) ;
PARAMETER:
  identifier : PermiteFluxo

```

```

index domain : (j,w,p,m,t)
definition : 1 $ [q(w,p,t)
and Maximo(j,t)
and PermiteModalUM(w,m)
and PermiteFluxoAutonomiaTanque(m,j,w)] ;
PARAMETER:
identifier : PermiteFluxoAutonomiaTanque
index domain : (m,j,w)
definition : 1 $ PermiteModalUM(w,m)
and cm(m)>CombMissao(j,w,m)
and (PMD(m)-PBO(m)-CombMissao(j,w,m)-Ppax)>=0 ;
PARAMETER:
identifier : PermiteModalUM
index domain : (w,m)
definition : if assentos(m)<=12 then 1 else (1- R_Heliponto(w)) endif ;
PARAMETER:
identifier : CombMissao
index domain : (j,w,m)
text : "Combustível necessário na aeronave para realização de uma missão,
segundo os padrões de segurança."
definition : Consumo(m) * (((d(j,w)/ Conversao_KM_Milha)/ vl(m))+
(t_extra(m) + TReserva(m))/ 60) ;
PARAMETER:
identifier : CombConsumo
index domain : (j,w,m)|PermiteFluxoAutonomiaTanque(m,j,w)
definition : Consumo(m) * (((d(j,w)/Conversao_KM_Milha)/ vl(m))+
(t_extra(m))/60) ;
PARAMETER:
identifier : FolgaPeso
index domain : (m,j,w)|PermiteFluxoAutonomiaTanque(m,j,w)
definition : (PMD(m) -PBO(m)- CombMissao(j,w,m)) ;
PARAMETER:
identifier : c
index domain : (m,j,w)|PermiteFluxoAutonomiaTanque(m,j,w)
text : "Capacidade disponível em número de assentos da aeronave por voo,
por par origem destino."
definition : if FolgaPeso(m,j,w)/Ppax < assentos(m)
then Floor[FolgaPeso(m,j,w)/Ppax]
else assentos(m)
endif ;
ENDSECTION ;
DECLARATION SECTION Variaveis
VARIABLE:
identifier : Frota
index domain : (j,t,m)| Maximo(j,t)
text : "Frota por aeroporto e modal. Deve ser inteira."
range : integer ;
VARIABLE:
identifier : a
index domain : (j,w,p,t,m)|PermiteFluxo(j,w,p,m,t)

```

```

text      : "Frota"
comment   : "Quantidade de helicópteros necessária para atender a demanda do
passageiro p da unidade w pelo aeródromo j no ano t. Esta variável é contínua pois
representa a fração necessária para atendimento a uma unidade, sendo que os
helicópteros são compartilhados por diversas unidades marítimas. Este número é
utilizado pelo modelo para o cálculo final da frota inteira." ;
VARIABLE:
identifier : k
index domain : (j,w,p,t,m)|PermiteFluxo(j,w,p,m,t)
text      : "Quantidade da demanda pelo produto p da unidade w atendida pelo
aeródromo j e modal m no ano t."
range     : {0..q(w, p, t)} ;
VARIABLE:
identifier : y
index domain : (j,t) | Maximo(j,t)
text      : "Variável indicativa de abertura de aeródromo."
range     : binary
comment   : "Será 1(um) se o aeródromo j estiver aberto no ano t e zero caso
contrário." ;
ENDSECTION ;
DECLARATION SECTION Restricoes
CONSTRAINT:
identifier : Manut_Aerodromo_Aberto
index domain : (j,t,t2)|t2>t and Maximo(j,t)
definition : y(j,t)<=y(j,t2) ;
CONSTRAINT:
identifier : Frota_Inteira
index domain : (j,t,m)|Maximo(j,t)
definition : Frota(j,t,m) >= sum[(w,p), a(j,w,p,t,m)] ;
CONSTRAINT:
identifier : Dimensionamento_de_frota
index domain : (j,w,p,t,m)| PermiteFluxo(j,w,p,m,t)
definition : a(j,w,p,t,m) >= (k(j,w,p,t,m))/(c(m,j,w)*util(m)*NV(j,w,p,m,t)) ;
CONSTRAINT:
identifier : Atendimento_Demanda
index domain : (w,p,t)|q(w,p,t)
definition : sum [(j,m),k(j,w,p,t,m)] >= q(w,p,t) ;
CONSTRAINT:
identifier : Max_Aerodromos
index domain : t
definition : sum[(j), y(j,t)]<=lim ;
CONSTRAINT:
identifier : Capacidade_maxima
index domain : (j,t)| Maximo(j,t)
definition : sum[(w,p,m), k(j,w,p,t,m)]<= Maximo(j,t)*y(j,t) ;
CONSTRAINT:
identifier : Capacidade_minima
index domain : (j,t)| Minimo(j,t)
definition : sum[(w,p,m), k(j,w,p,t,m)]>= Minimo(j,t)*y(j,t) ;
CONSTRAINT:

```

```

    identifier : Restricao_Vagas
    index domain : (j,t)|Maximo(j,t)
    text      : "Garante que a restrição de quantidade de vagas disponíveis no
aeródromo para estacionamento de aeronaves seja respeitada."
    definition : sum[m, Frota(j,t,m)]<=Max_Vagas(j,t)*y(j,t) ;
ENDSECTION ;
DECLARATION SECTION FO
VARIABLE:
    identifier : Custo_Total
    definition : sum[(j,t,m),CF(m) * frota(j,t,m)] + sum[(j,w,p,t,m), CV(m) *
k(j,w,p,t,m) * d(j,w)/ (c(m,j,w) * util(m))] + sum[j, I_F(j) *
IndicaAerodromoAberto(j)] + sum[j,C_O(j) * sum[(w,p,t,m),k(j,w,p,t,m)]] + BigM *
sum[(j,t), y(j,t)] ;
SET:
    identifier : Habilitar_Restricoes
    subset of : AllConstraints
    definition : data{Manut_Aerodromo_Aberto, Frota_Inteira,
Dimensionamento_de_frota, Atendimento_Demanda, Max_Aerodromos,
Capacidade_maxima, Capacidade_minima, Restricao_Vagas} ;
MATHEMATICAL PROGRAM:
    identifier : Funcao_Minimizacao
    objective : Custo_Total
    direction : minimize
    constraints : AllConstraints
    variables : AllVariables
    type : MIP ;
ENDSECTION ;
ENDSECTION Modelo ;
PROCEDURE
    identifier : MainInitialization
    body :
        !Antes de iniciar o input de dados, exclui-se todas as informações armazenadas nas
entidades, parâmetros, restrições e variáveis para evitar erros e deixar o arquivo mais
leve.
        empty AllSets, AllParameters, AllVariables, AllConstraints;
        read from table In_Aerodromo;
        read from table In_UM;
        read from table In_Ano;
        read from table In_Modal;
        read from table In_Portal;
        read from table In_UO;
        read Maximo(j,t),Minimo(j,t),Max_Vagas(j,t) from table In_Cap_Aerodromo;
        read q(w,p,t), u from table In_Demanda;
        read p, nome_produto(p) from table In_Produto;
        read nome_UM(w),Indica_UM_Portal(w), R_Heliponto(w) from table
In_nome_UM;
        read Escolha_UM_Portal(w,n) from table In_Matriz_nw;
        BigM:= sum((w,p,t), q(w,p,t));
ENDPROCEDURE ;
SECTION Resultados

```

```

DECLARATION SECTION Tabelas_de_Resultados
PARAMETER:
  identifier : InvestimentoTotal
  definition : sum[j, I_F(j)*IndicaAerodromoAberto(j)] ;
PARAMETER:
  identifier : Custoperacional
  definition : sum[j,C_O(j)*sum[(w,p,t,m),k(j,w,p,t,m)]] ;
PARAMETER:
  identifier : Custovariavel
  definition : sum[(j,w,p,t,m), CV(m)*k(j,w,p,t,m)*d(j,w)/(c(m,j,w)*util(m))] ;
PARAMETER:
  identifier : Custofixo
  definition : sum[(j,t,m),CF(m)*frota(j,t,m)] ;
PARAMETER:
  identifier : Penalizacao
  definition : BigM*sum[(j,t), y(j,t)] ;
PARAMETER:
  identifier : Fluxo
  index domain : (j,t)
  definition : sum[(w,p,m),k(j,w,p,t,m)] ;
PARAMETER:
  identifier : FrotaTot
  index domain : (j,t)
  definition : sum[m, Frota(j,t,m)] ;
PARAMETER:
  identifier : Investimento
  index domain : j
  definition : I_F(j)*IndicaAerodromoAberto(j) ;
ENDSECTION ;
ENDSECTION Resultados ;
PROCEDURE
  identifier : MainExecution
  body :
    !MainInitialization;
    showProgressWindow;
    solve Funcao_Minimizacao;
ENDPROCEDURE ;
PROCEDURE
  identifier : MainTermination
  body :
    if ( CaseSaveAll( confirm:2 ) = 1 ) then
      return 1;
    else
      return 0;
    endif ;
ENDPROCEDURE ;
ENDMODEL Main_Planejamento_de_Rede_Logistica_de_Passageiros ;

```