

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

GLEND KLEISER GOUVEIA DIAS

UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA O *AIRCRAFT RECOVERY PROBLEM* DE
COMPANHIAS AÉREAS REGULARES DE PEQUENO PORTE

JOÃO PESSOA

2015

GLEND KLEISER GOUVEIA DIAS

UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA O *AIRCRAFT RECOVERY PROBLEM* DE
COMPANHIAS AÉREAS REGULARES DE PEQUENO PORTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Linha de pesquisa: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Anand Subramanian

Co-Orientador: Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

João Pessoa

2015

D541u Dias, Glend Kleiser Gouveia
Uma proposta de solução para o aircraft recovery problem de
companhias aéreas regulares de pequeno porte. / Glend Kleiser Gouveia
Dias. João Pessoa: UFPB, 2015.
102 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Anand Subramanian
Co-Orientador: Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal da
Paraíba.

1. Gestão das interrupções 2. Aviação civil 3. Aircraft Recovery
Problem 4. Otimização I. Título.

CDU:658.5(043)

GLEND KLEISER GOUVEIA DIAS

UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO PARA O *AIRCRAFT RECOVERY PROBLEM* DE
COMPANHIAS AÉREAS REGULARES DE PEQUENO PORTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da
Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre.
Linha de pesquisa: Pesquisa Operacional.

Aprovada em 28 de maio de 2015.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Anand Subramanian — Orientador
Departamento de Engenharia de Produção — UFPB



Prof. Dr. Lucídio dos Anjos Formiga Cabral — Co-Orientador
Departamento de Computação Científica — UFPB



Prof. Dr. Luciano Costa Santos — Examinador Interno
Departamento de Engenharia de Produção — UFPB



Prof. Dr. Puca Huachi Vaz Penna — Examinador Externo
Departamento de Ciência Exatas, Biológicas e da Terra — Instituto do Noroeste
Fluminense de Educação Superior — UFF

“Você tem que pensar sempre grande. Eu nunca quis ser o rabo do leão, eu preferiria ser a cabeça de um rato. O sucesso do presente só será perpetuado com ideias novas e criativas.”

Ozires Silva (fundador da Embraer)

AGRADECIMENTOS

Deus

- A Deus, pelo livre arbítrio e inspiração dados ao homem.

Academia

- Ao meu orientador Anand, pela amizade, confiança na minha capacidade, compreensão das dificuldades, viabilização deste trabalho, dedicação e orientação.
- Ao meu co-orientador Lucídio Formiga, pela transferência de parte da sua grande experiência na aviação civil.
- A Arthur Kramer, pela solidariedade incondicional em ajudar nos mais diversos assuntos, tanto no período das disciplinas quanto no período da escrita da dissertação.
- A Luciano Costa, pelos inúmeros esclarecimentos prestados ao longo desse período.
- A Ana Araújo, pela atenção e presteza nas diversas vezes que a consultei.
- Aos professores membros da banca, representados por Luciano Santos e Puca Huachi, que contribuíram com o texto final desta dissertação. Agradeço também ao professor Celso Sakuraba pela participação na banca de qualificação.
- A todos os professores das disciplinas que contribuíram para a minha formação em nível de mestrado.

Família e namorada

- A minha namorada Jéssica, pela compreensão, paciência e companheirismo.
- Aos meus pais Genival e Genilda, pela compreensão e amor.
- As minhas irmãs Greicy e Keilla, pela preocupação com o meu bem-estar e pelos conselhos técnicos e não-técnicos.

- Aos meus cunhados Hécio e Franklin, pelos conselhos otimistas e pelos momentos descontraídos nesse período.
- Aos meus sobrinhos Gabriel e Davi, pelos momentos de descontração proporcionados.
- Ao meu primo Lucas, por na reta final ter tido a disponibilidade de revisar todo o texto dissertativo.
- A todos os membros em geral da minha família que se preocuparam com o meu bem-estar e pelas divertidas reuniões realizadas (grupo “*WhatsApp* Família Gouveia Alves”).

ANAC

- Aos amigos de trabalho, em ordem alfabética, Aldrin, Carlson, Fátima Guimarães, Ferreira, Francinaldo, Julião, Valdemar e Vitor Panetto, que me apoiaram e ajudaram de diversas formas nessa trajetória.
- Às chefias direta e ao RH, que dentro das suas possibilidades me compreenderam e apoiaram nessa caminhada.

RESUMO

As companhias aéreas de voos regulares possuem previamente definidos os aeroportos que serão operados, os dias e os horários de pouso e decolagem das suas aeronaves. É possível que essa programação sofra interrupções e causem prejuízos financeiros devido aos atrasos e/ou cancelamentos dos voos. Nessas situações, normalmente as companhias aéreas usam a experiência dos seus profissionais e procuram minimizar os impactos realocando as aeronaves, tripulantes e em seguida os passageiros. Não há garantia que esse método retorne um bom resultado do ponto de vista econômico, sobretudo em períodos de grande demanda por passageiros. Mediante essa dificuldade, diversos autores têm estudado o *Airline Recovery Problem* empregando diferentes técnicas de otimização. Esse problema é composto basicamente por três subproblemas: *Aircraft Recovery Problem* (ARP), *Crew Recovery Problem* (CRP) e *Passenger Recovery Problem* (PRP). Como forma de definir o novo sequenciamento das aeronaves de uma companhia aérea brasileira que, em situações de interrupções das operações, resulte no menor custo devido aos atrasos e/ou cancelamentos dos voos, esta pesquisa apresenta uma proposta de solução do ARP a partir da representação dos voos por uma rede tempo-espço e modelagem matemática análoga ao problema do fluxo de custo mínimo. Para a análise do ARP, foram utilizados dados de uma companhia aérea brasileira para a construção das redes tempo-espço com bandas de 30, 20 e 15 minutos e empregadas 100 instâncias que simularam a indisponibilidade de até 3 aeronaves em diferentes nós dessas redes. As soluções baseadas nessas bandas foram resolvidas via Programação Linear Inteira e apresentaram resultados médios, respectivamente, 38,24%; 40,44% e 41,15% melhores do que as soluções triviais. A banda de 15 min mostrou-se mais adequada porque possibilitou uma análise mais realista dos eventos de pousos e decolagens e resultou numa diferença média maior entre as soluções ótimas e as triviais. Outras 95 instâncias foram testadas para uma rede tempo-espço com banda de 15 min e aeronave reserva localizada no aeroporto de maior movimento. O resultado foi 38,68% melhor do que a situação sem aeronave reserva, mas não conclusivo por ser necessária uma análise de viabilidade econômica sobre a aquisição e disponibilização de uma nova aeronave na frota.

Palavras-chave: Gestão das interrupções. Aviação civil. *Aircraft Recovery Problem*. Otimização.

ABSTRACT

The airlines that operate regular flights define in advance the airports to be operated and the landing and takeoff schedule of its aircraft. This scheduling is likely to suffer interruptions causing financial losses due to delays and/or cancellations of flights. In these situations, the airlines usually use the experience of their professionals and seek to minimize the impacts by relocating the aircraft, crew and then passengers. There is no guarantee that such method will lead to good results from an economic point of view, especially in periods of high demands of passengers. Due to this difficulty, several authors have studied the Airline Recovery Problem using different optimization techniques. This problem is basically composed of three sub-problems: Aircraft Recovery Problem (ARP), Crew Recovery Problem (CRP) and Passenger Recovery Problem (PRP). In order to define the new least-cost aircraft scheduling of a Brazilian airline (in operation interruption situations) due to delays and/or cancellations of flights, this research presents an ARP solution proposal starting from the representation of flights through a network time-space and mathematical modeling analogous to the minimum cost flow problem. To analyze the ARP, data was used from a Brazilian airline for building the time-space networks with bands of 30, 20 and 15 minutes, and 100 instances were utilized to simulate the unavailability of up to 3 aircraft on different nodes of such networks. The solutions based on these bands were solved via Integer Linear Programming and with average improvements of 38.24%, 40.44% and 41.15%, respectively, with respect to the trivial solutions. The band of 15 min was more appropriate because it provided a more realistic analysis of takeoffs and landings events and resulted in a greater difference, on average, between the optimal solutions and the trivial ones. Other 95 instances were tested for a time-space network with 15 min band and a spare aircraft located at the busiest airport. In this case the results were 38.68% better than the situation without a spare aircraft, but it was not conclusive because an economic feasibility analysis on the acquisition and deployment of a new aircraft in the fleet must be performed.

Keywords: Disruption management. Civil aviation. Aircraft Recovery Problem. Optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	AVIAÇÃO CIVIL	20
2.1.1	Sistema de aviação civil brasileiro	20
2.1.2	Operadores aéreos	26
2.1.3	Gestão das interrupções no setor aéreo	31
2.2	OTIMIZAÇÃO NA AVIAÇÃO CIVIL	34
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	43
4	ASPECTOS METODOLÓGICOS	55
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	55
4.2	UNIDADE DE ANÁLISE	56
4.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	56
4.4	METODOLOGIA PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	56
4.5	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO MÉTODO	70
4.6	LIMITAÇÕES DO MÉTODO	71
5	RESULTADOS	72
5.1	REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 30 min	72
5.2	REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 20 min	80
5.3	REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 15 min	85
5.4	REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 15 min E AERONAVE RE-SERVA	90
5.5	COMPARATIVO ENTRE AS REDES COM DIFERENTES TAMANHOS DE BANDAS	93
6	CONCLUSÃO	95

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução dos voos regulares entre os anos de 2004 e 2013	16
1.2	Volume de passageiros transportados pelas companhias aéreas brasileiras entre os anos de 2004 e 2013	16
1.3	Percentual dos voos regulares atrasados e cancelados entre os anos de 2004 e 2013	17
2.1	Participação dos 20 principais aeroportos brasileiros na quantidade de decolagens de voos domésticos no ano de 2013	22
2.2	Estrutura da aviação civil brasileira	23
3.1	Representação da rede de fluxo de custo mínimo	44
3.2	Solução para o fluxo de custo mínimo	45
3.3	Rede tempo-espaço	48
3.4	Representação esquemática dos conjuntos P_k e H_k^i	52
3.5	Representação esquemática dos conjuntos L_i e M_k^i	52
3.6	Representação esquemática dos conjuntos G_i e Q_i	53
4.1	Etapas para a resolução do problema	57
4.2	Marcação dos nós iniciais da aeronave 7	62
4.3	Exemplo marcação dos nós adicionais	64
4.4	Ilustração das instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z	67
4.5	Ilustração das instâncias do tipo DISP-X-Y-Z	68
4.6	Ilustração da solução trivial para instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z	69
4.7	Ilustração da solução trivial para instâncias do tipo DISP-X-Y-Z	69
5.1	Rede tempo-espaço com banda de 30 min	76
5.2	Solução ótima <i>versus</i> solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min	79
5.3	Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min	79
5.4	Rede tempo-espaço com banda de 20 min	81
5.5	Solução ótima <i>versus</i> solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min	84
5.6	Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min	84
5.7	Rede tempo-espaço com banda de 15 min	86
5.8	Solução ótima <i>versus</i> solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min	89
5.9	Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min	90
5.10	Solução ótima sem aeronave reserva <i>versus</i> solução ótima com aeronave reserva para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min	92

5.11	Diferença percentual entre a solução ótima sem aeronave reserva e a solução ótima com aeronave reserva para a rede tempo-espaco com banda de 15 min	93
------	---	----

LISTA DE TABELAS

2.1	Quantitativo de aeronaves por companhia aérea brasileira no ano de 2013	27
2.2	Participação das cinco maiores companhias aéreas brasileiras em passageiros pagos durante o ano de 2013	28
2.3	Quantidade de empregados por tipo de função nas companhias aéreas brasileiras entre os anos de 2010 e 2013	28
2.4	Quantidade de empregados por companhia aérea brasileira no ano de 2013	29
2.5	Composição das receitas das companhias aéreas brasileiras no ano de 2013	30
2.6	Composição dos custos das companhias brasileiras no ano de 2013	30
2.7	Resumo dos autores que pesquisaram sobre o <i>Airline Recovery Problem</i>	39
3.1	Exemplo programação de voos	47
4.1	Sequenciamento original das aeronaves	58
4.2	Todos os voos que saem de SBGR segundo o HOTRAN da PASSAREDO	63
5.1	Solução ótima para a instância INDISP-49-339-146	75
5.2	Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1	76
5.3	Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 30 min	78
5.4	Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1	81
5.5	Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 20 min	83
5.6	Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1	87
5.7	Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 15 min	88
5.8	Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 15 min e aeronave reserva	91
5.9	Soluções ótimas <i>versus</i> soluções triviais e solução ótima sem aeronave reserva <i>versus</i> solução ótima com aeronave reserva para a rede tempo-espaço com banda de 15 min	94

LISTA DE ABREVIACOES

AGIFORS	<i>Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies</i>
ALARP	<i>As Low As Reasonably Practicable</i>
ANAC	Agncia Nacional de Aviao Civil
ARP	<i>Aircraft Recovery Problem</i>
CBA	Cdigo Brasileiro de Aeronutica
CCO	Centro de Controle de Operaoes
CONAC	Conselho de Aviao Civil
CRP	<i>Crew Recovery Problem</i>
CSP	<i>Crew Scheduling Problem</i>
DECEA	Departamento de Controle do Tráfego Areo
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAB	Força Area Brasileira
FAP	<i>Fleet Assignment Problem</i>
GDP	<i>Ground Delay Program</i>
GRASP	<i>Greedy Adaptive Search Procedure</i>
HOTRAN	Horário de Transporte
IAC	Instruo de Aviao Civil
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária
IS	Instruo Suplementar
MRP	<i>Maintenance Routing Problem</i>
OACI	Organizao da Aviao Civil Internacional
ONU	Organizao das Naoes Unidas
PLI	Programao Linear Inteira
PO	Pesquisa Operacional
PRP	<i>Passenger Recovery Problem</i>
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviao Civil
RBHA	Regulamento Brasileiro de Homologaao Aeronutica
ROADEF	<i>Recherche Oprationnelle et Aide à la Dcision</i>
SAC	Secretaria de Aviao Civil
SARPS	<i>Standards and Recommended Practices</i>
SDP	<i>Schedule Design Problem</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DE PESQUISA

As operações das companhias aéreas comerciais de passageiros são planejadas, de forma regular, com base nas previsões de demanda por passageiros e recursos disponíveis.

Segundo o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil RBAC-119 (2010), uma operação regular é aquela que a companhia aérea torna público, previamente, os aeroportos que serão operados, os dias e os horários de pouso e decolagem das suas aeronaves.

Todas as operações aéreas regulares precisam ter seu Horário de Transporte (HOTRAN) definido. Segundo a Instrução de Aviação Civil (IAC) nº IAC-1223 (2000), HOTRAN é o documento aprovado e emitido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) que formaliza as concessões para a exploração dos serviços de transporte regular de passageiros e/ou carga, pelas empresas de transporte aéreo, com os respectivos horários, números de voos, frequências, tipos de aeronaves e oferta de assentos.

Para Clausen et al (2010), existem eventos inesperados que podem provocar interrupções nas operações normais das companhias aéreas. Como exemplo é possível mencionar a indisponibilidade de aeronaves por problemas mecânicos, falta de tripulantes por motivo de doença ou até mesmo por falhas de escala, fechamento de aeroportos devido a mau tempo ou por questões de segurança etc. Em casos como esses, é preciso que as companhias aéreas tomem ações mitigadoras no sentido de minimizar os atrasos e cancelamentos dos voos, custos operacionais e impactos sobre os passageiros.

Mediante a necessidade de apoiar a decisão nessas situações, fica assim instituído, conforme descreve a literatura, o *Airline Recovery Problem*. Para Clarke (1998), esse tipo

de problema é dividido em três subproblemas, a saber: *Aircraft Recovery Problem* (ARP), *Crew Recovery Problem* (CRP) e *Passenger Recovery Problem* (PRP).

Esses subproblemas são analisados em situações de interrupções das operações das companhias aéreas e visam minimizar os custos e possibilitar a retomada das operações normais o mais rápido possível. O PRP consiste na acomodação e apoio aos passageiros, o CRP na atribuição de tripulantes nos diferentes voos e o ARP, para Bisailon et al (2011), na definição dos sequenciamentos das aeronaves disponíveis da frota, durante um dado período de tempo de recuperação, visando a minimização dos custos.

Diversos autores tem estudado o ARP, CRP e o PRP separadamente, ou acoplados uns aos outros, com diferentes formas de tratamento e empregando diferentes técnicas para resolução.

A literatura nacional carece de mais estudos quantitativos sobre problemas de otimização relacionados à aviação, sobretudo tratando de recuperação de aeronave, tripulantes e passageiros em situações de interrupções das operações.

Mediante essa lacuna bibliográfica, e principalmente devido à necessidade das companhias aéreas possuírem ferramentas ágeis que auxiliem na tomada de decisões, sobretudo em períodos de grandes demandas por passageiros, esta pesquisa pretende responder ao seguinte problema: **dada uma programação original de voos previstos no HO-TRAN de uma companhia aérea brasileira, e após a ocorrência de indisponibilidades de aeronaves, quais os novos sequenciamentos das aeronaves restantes que permitirão o cumprimento dos voos programados com o menor custo total possível?**

A solução do ARP é aquela que torna possível as seguintes decisões com o menor valor possível da função objetivo:

- Quais voos deverão ocorrer entre os diferentes aeroportos, ainda que atrasados?
- Quais voos deverão ser cancelados?
- Qual o número de aeronaves requeridas nos diferentes aeroportos como forma de garantir a continuidade das operações no dia seguinte?

1.2 JUSTIFICATIVA

Para Bisailon et al (2011), apesar de um planejamento cuidadoso, as operações regulares muitas vezes são interrompidas por eventos imprevistos, como por exemplo, atraso ou cancelamento dos voos devido a falhas mecânicas nas aeronaves, mau tempo, congestionamento dos aeroportos ou problemas de segurança. Segundo dados da FAA (2015), durante o ano de 2014, as principais causas dos atrasos dos voos das companhias aéreas dos Estados Unidos foram devido a mau tempo (52,25%), volume de tráfego (34,58%) e fechamento de pista (7,76%).

O impacto econômico das interrupções é igualmente considerável. Um relatório da NEXTOR (2010) aponta que no ano de 2007 as companhias aéreas dos EUA tiveram um custo direto de \$31 bilhões devido a atraso.

Quando o mau tempo ou outras irregularidades provocam redução da capacidade operativa de um determinado aeroporto dos EUA, o controle de tráfego aéreo adota o *Ground Delay Program* (GDP) que consiste basicamente na redução temporária do fluxo dos voos que chegam ou partem dos aeroportos até que suas operações sejam normalizadas.

Os efeitos negativos das interrupções tornam-se ainda mais críticos nos períodos em que a demanda por passageiros cresce e as infraestruturas aérea e aeroportuária não acompanham esse crescimento.

A Figura 1.1 apresenta a evolução da quantidade de voos regulares no Brasil entre os anos de 2004 e 2013. É possível observar que houve um aumento de 83,1% nesse período, apesar da retração do número de voos entre os anos de 2012 e 2013.

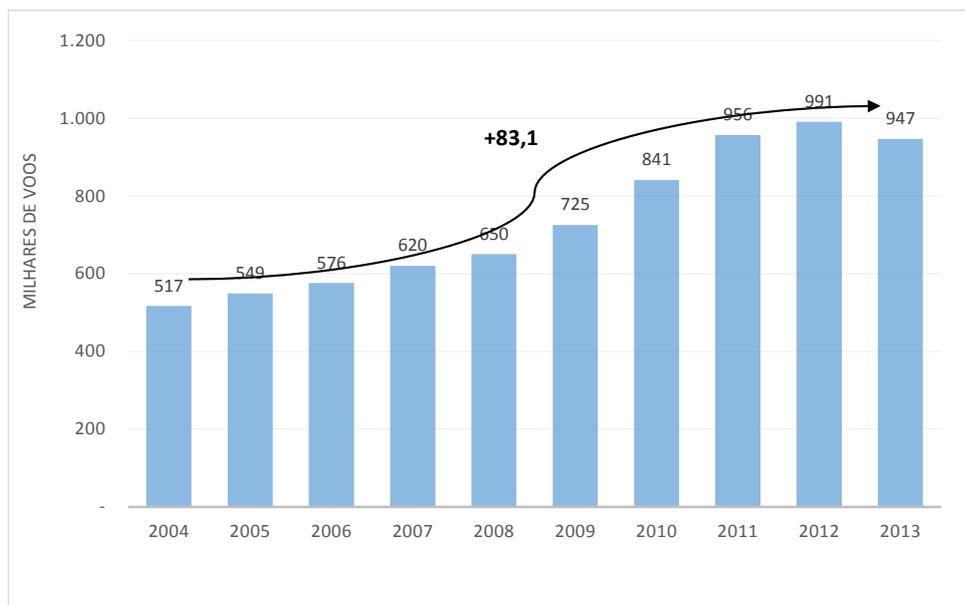


Figura 1.1: Evolução dos voos regulares entre os anos de 2004 e 2013
Fonte: ANAC (2013)

No mesmo período de avaliação, a Figura 1.2 mostra que entre os anos de 2004 e 2013 houve um incremento de 181% no volume de passageiros transportados pelas companhias aéreas de voos regulares do Brasil.

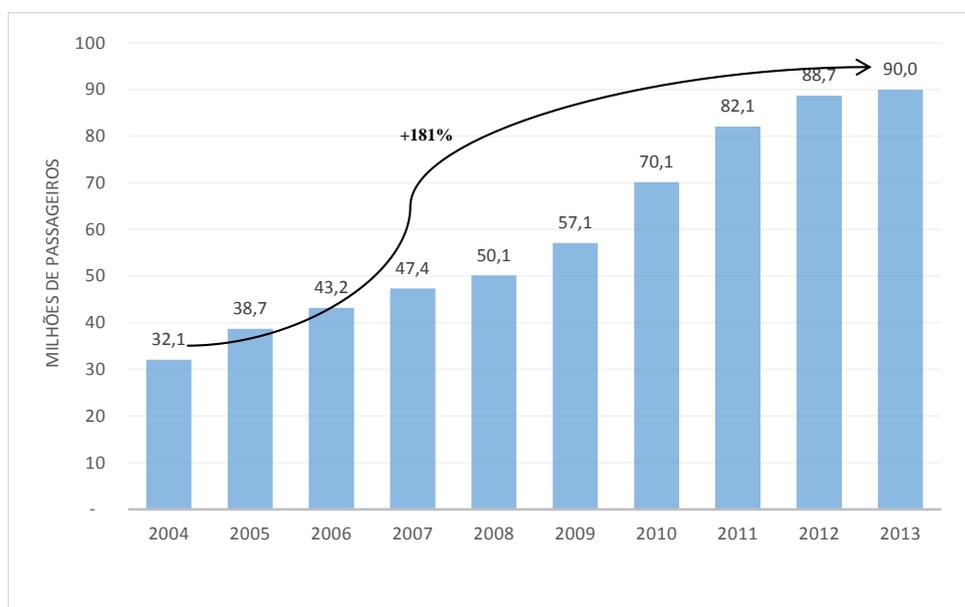


Figura 1.2: Volume de passageiros transportados pelas companhias aéreas brasileiras entre os anos de 2004 e 2013
Fonte: ANAC (2013)

Um estudo apresentado pela empresa de consultoria McKinsey&Company (2010) aponta que até o ano de 2030 o Brasil deverá ter um aumento médio anual de 5,1% na demanda por passageiros de voos regulares. Além disso, em períodos específicos como

festas de final de ano, carnaval, feriados prolongados, eventos esportivos internacionais, dentre outros casos, costumam sobrecarregar toda a infraestrutura da aviação civil.

Nos anos de 2006 e 2007, o Brasil passou por um período no seu sistema que ficou conhecido como “caos aéreo”. Segundo dados estatísticos da ANAC, nos meses de novembro e dezembro de 2006, as principais companhias aéreas nacionais de voos regulares tiveram um índice médio de eficiência operacional de apenas 64% e 40%, respectivamente, e provocaram enormes transtornos aos passageiros e também prejuízo financeiro às companhias. O cálculo do índice da eficiência operacional leva em conta a regularidade e pontualidade dos voos.

A Figura 1.3 apresenta o percentual de voos cancelados, atrasados mais de 30 min e atrasados mais de 60 min durante os anos de 2004 e 2013. Nessa série de avaliações, o ano de 2007 foi o mais crítico com 19,70% dos voos cancelados, 30,40% com atrasos superiores a 30 min e 16,58% com atrasos superiores a 60 min.

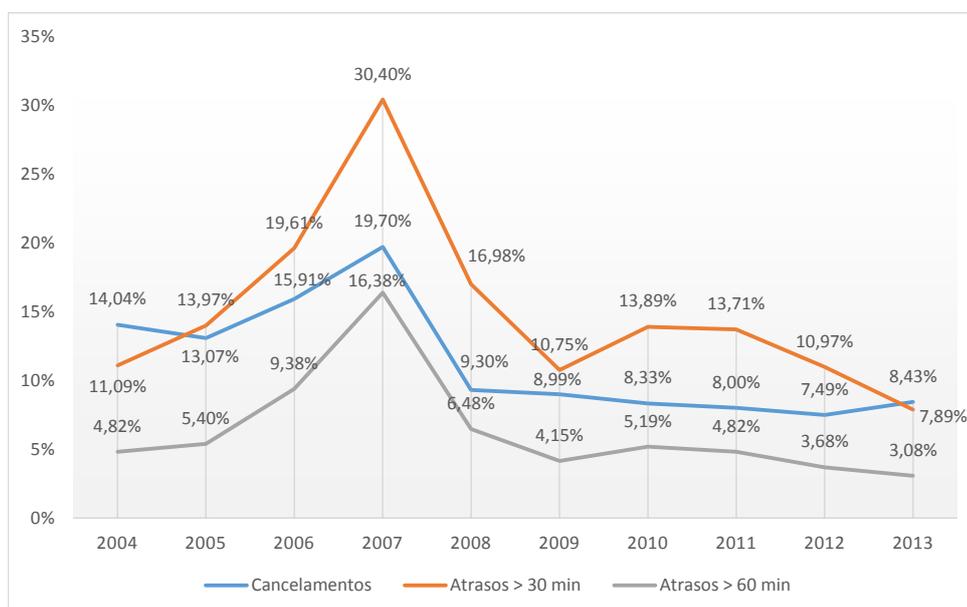


Figura 1.3: Percentual dos voos regulares atrasados e cancelados entre os anos de 2004 e 2013
Fonte: ANAC (2013)

Segundo Bisailon et al (2011), em situação de interrupções das operações, normalmente as companhias aéreas primeiramente determinam o novo sequenciamento das aeronaves sem levar em conta todo o universo de possibilidades, em seguida realocam os tripulantes nos diferentes voos e, por fim, garantem a chegada dos passageiros nos seus destinos finais. Tratar os subproblemas de maneira isolada e sequenciada simplifica a tomada

de decisões, no entanto, pode conduzir a soluções pobres do ponto de vista de otimização.

Para Maher (2014b), a maioria das empresas tem se preocupado com o planejamento dos seus voos, mas não se preparam, de maneira eficiente, para as situações de contingência.

No contexto da aviação, Arguello et al (1997) utilizaram uma metodologia conhecida como *Greedy Adaptive Search Procedure* (GRASP) para a resolução do ARP aplicado a uma companhia aérea. Segundo os autores, essa metaheurística consistiu em duas fases básicas: a primeira gera opções de soluções viáveis e a segunda é uma busca local que encontra a solução ótima local.

No referido estudo, foram empregados dados da *Continental Airlines* e foi considerado um escopo reduzido de 42 voos, realizados por 16 aeronaves e operados em 13 aeroportos. Foram testadas 6068 instâncias considerando até 5 aeronaves indisponíveis para operações durante todo o dia. Como resultado, em 90% das instâncias o valor obtido teve uma diferença de 10% em relação ao valor ótimo e com um tempo de resposta de até 15 segundos para cada instância. A título de comparação, caso a opção da companhia aérea fosse simplesmente cancelar todos os voos que seriam realizados pelas aeronaves indisponíveis, apenas 8% das instâncias teriam a sua solução com uma diferença de 10% do valor ótimo.

Assim, devido às diversas possibilidades de ocorrência de interrupções nas operações que causam impactos econômicos negativos, sobretudo em períodos de alta demanda por passageiros, e também devido à necessidade das companhias aéreas possuírem metodologias eficientes que minimizem os custos operacionais nessas situações, existe um notório interesse no desenvolvimento de ferramentas de resposta rápida e eficaz de apoio à tomada de decisões.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma solução para o ARP de companhias aéreas regulares de pequeno porte.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir o modelo matemático a partir das bibliografias clássicas e mais atualizadas sobre o ARP.
- Selecionar a técnica de otimização que servirá de base para a resolução do modelo matemático.
- Coletar os dados disponibilizados pela ANAC referentes a uma companhia aérea brasileira.
- Implementar em linguagem computacional a técnica de otimização.
- Testar o método de resolução por meio de instâncias geradas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O **Capítulo 1** trata sobre a definição do tema e do problema de pesquisa, justificativa e os objetivos geral e específicos. O **Capítulo 2** apresenta uma breve fundamentação teórica sobre a aviação civil e aplicações de otimização. O **Capítulo 3** detalha sobre a formulação matemática empregada para a análise do ARP. O **Capítulo 4** define a metodologia adotada para a resolução do modelo matemático. Por fim, o **Capítulo 5** apresenta os resultados e discussões desta pesquisa e o **Capítulo 6** as conclusões e possibilidades de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Nesta revisão da literatura, são abordados os seguintes assuntos: sistema de aviação civil brasileiro, operadores aéreos, gestão das interrupções no setor aéreo e otimização na aviação civil.

2.1 AVIAÇÃO CIVIL

2.1.1 Sistema de aviação civil brasileiro

A Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), agência especializada da ONU, criada em virtude da convenção de Chicago de 1944, promove, por meio da cooperação entre os países membros, a segurança e o desenvolvimento sustentável da aviação civil mundial (ICAO, 2014).

A OACI mantém documentos chamados de “Anexos à Convenção de Chicago”. Esses documentos propõem aos países membros medidas em todos os setores da aviação civil internacional por meio das *Standards and Recommended Practices* (SARPS).

Conforme consta no decreto 21.713 (1946), o Brasil é membro signatário da OACI e toda a sua estrutura da aviação civil segue as recomendações previstas nos seus anexos.

A lei 7.565 (1986), conhecida como Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA), descreve e estabelece que o sistema de aviação civil brasileiro é composto basicamente por:

- Transporte aéreo.
- Indústria aeronáutica.

- Infraestrutura aeroportuária.
- Espaço aéreo.

O transporte aéreo no Brasil é composto por entes que prestam serviços aéreos privados e públicos. Segundo o CBA, os serviços aéreos privados são aqueles realizados sem remuneração e em benefício do próprio operador. Já os serviços aéreos públicos abrangem os serviços especializados públicos e os serviços de transporte aéreo público de passageiro, carga ou mala postal, regular ou não regular, doméstico ou internacional. A Subseção 2.1.2 amplia a discussão sobre transporte aéreo e operadores aéreos.

Quanto à indústria aeronáutica, esta é constituída por empresas de fabricação, revisão, reparo e manutenção de produtos aeronáuticos. Segundo dados da ANAC, atualmente existem no Brasil 17 empresas com certificação válida e que fabricam aeronaves, helicópteros, peças de reposição, embalagens para o transporte de produtos perigosos, dentre outros produtos aeronáuticos, e 483 empresas que prestam serviços de manutenção.

O sistema aeroportuário brasileiro é constituído por aeródromos destinado a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves, a pistas, pátio de estacionamento das aeronaves, terminal de passageiros e suas respectivas facilidades. Conforme definido no CBA, as facilidades podem ser entendidas como o balizamento diurno e noturno, iluminação do pátio, serviço contra incêndio especializado, serviço de remoção de emergência médica, área de pré-embarque, climatização, ônibus, ponte de embarque, sistema de esteiras para despacho de bagagem, carrinhos para passageiros, pontes de desembarque, sistema de ascenso-descenso de passageiros por escadas rolantes, orientação por circuito fechado de televisão, sistema semi-automático anunciador de mensagem, sistema de som, sistema informativo de voo, climatização geral, locais destinados a serviços públicos, locais destinados a apoio comercial, serviço médico, serviço de salvamento aquático especializado e outras, cuja implantação é autorizada ou determinada pela ANAC.

O RBAC-01 (2011) conceitua aeródromo como sendo uma área delimitada em terra ou na água destinada, no todo ou em parte, para pouso, decolagem e movimentação em superfície de aeronaves; inclui quaisquer edificações, instalações e equipamentos de apoio e de controle das operações aéreas, se existirem. Quando destinado exclusivamente a

helicópteros, recebe denominação de heliponto.

A Figura 2.1 analisada em conjunto com a Figura 1.1 mostra que 79,61% dos voos regulares no Brasil, durante o ano de 2013, ocorreram a partir de apenas 20 aeroportos. Os cinco aeroportos mais movimentados foram o de Guarulhos/São Paulo, Congonhas/São Paulo, Juscelino Kubitschek/Brasília, Viracopos/Campinas e Galeão/Rio de Janeiro.

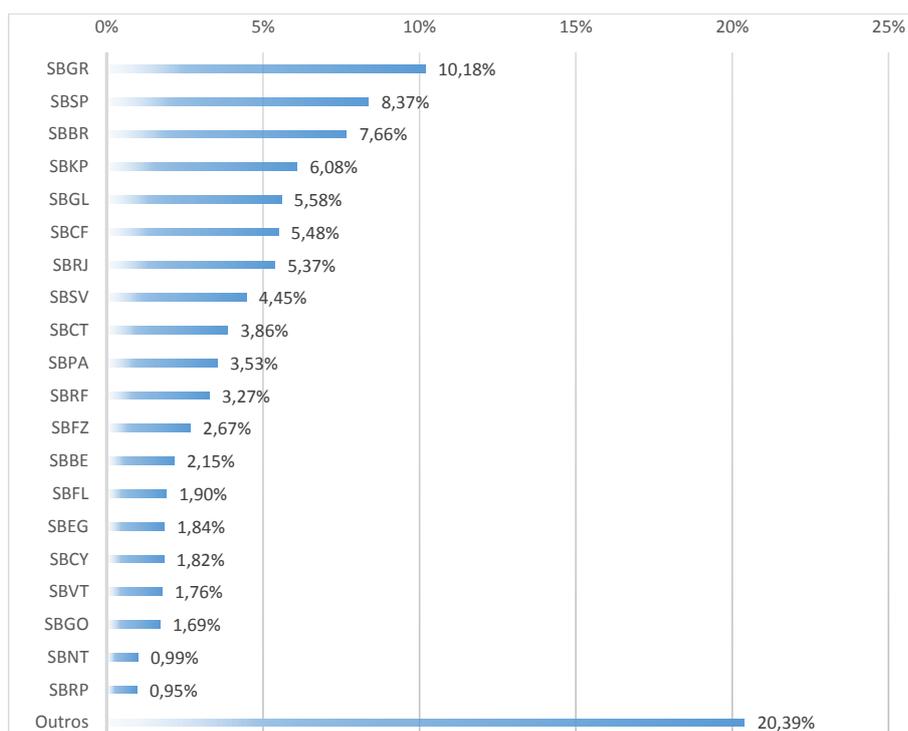


Figura 2.1: Participação dos 20 principais aeroportos brasileiros na quantidade de decolagens de voos domésticos no ano de 2013

Fonte: ANAC (2013)

Segundo o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA), o Brasil tem a responsabilidade de administrar o espaço aéreo territorial ($8.511.965 \text{ km}^2$) e o espaço aéreo sobrejacente à área oceânica, que se estende até o meridiano 10° W , perfazendo um total de 22 milhões de km^2 .

Nesse espaço, existem diversos eventos acontecendo ao mesmo tempo, tais como: voos comerciais, voos militares, ensaio de voo, lançamento de sondas e foguetes, voos de asa delta, salto de paraquedas, treinamento de tiros antiaéreos, entre outros.

A estrutura da aviação civil do Brasil, conforme definida pelo CBA, é de responsabilidade do estado brasileiro e sua administração é realizada pela Secretaria de Aviação Civil (SAC), Conselho de Aviação Civil (CONAC), ANAC, INFRAERO e DECEA. A

Figura 2.2 sumariza a relação entre os diferentes entes.

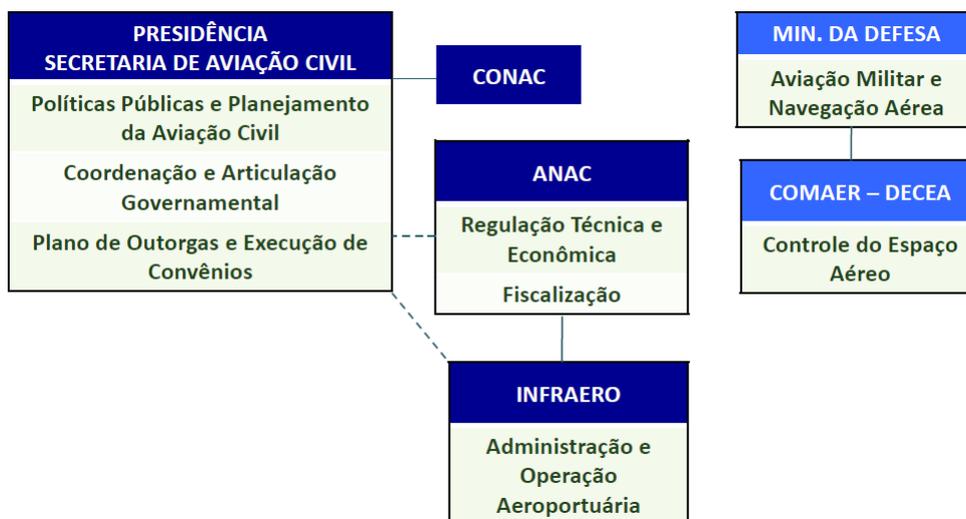


Figura 2.2: Estrutura da aviação civil brasileira

Fonte: SAC (2015)

As principais competências da SAC, extraídas do decreto 7.476 (2011), são:

- Formular, coordenar e supervisionar as políticas para o desenvolvimento do setor de aviação civil e das infraestruturas aeroportuária e aeronáutica civil.
- Elaborar estudos e projeções relativos aos assuntos de aviação civil e de infraestruturas aeroportuária e aeronáutica civil.
- Formular e implementar o planejamento estratégico do setor, definindo prioridades dos programas de investimentos.
- Elaborar e aprovar os planos de outorgas para exploração da infraestrutura aeroportuária.
- Administrar recursos, fundos e programas de desenvolvimento da infraestrutura de aviação civil.
- Coordenar os órgãos e entidades do sistema de aviação civil.
- Formular, implementar, avaliar e monitorar as políticas do setor de aviação civil, promovendo a concorrência, de forma a assegurar a prestação adequada dos serviços, a modicidade de tarifas e a agregação de novos usuários ao modal de transporte aéreo.

- Atribuir a infraestrutura aeroportuária a ser implantada, administrada, operada e explorada pela INFRAERO.
- Coordenar e acompanhar os assuntos referentes à aviação civil, às infraestruturas aeroportuária e aeronáutica civil que necessitem de posicionamento do Brasil junto aos organismos internacionais.

O decreto 3.564 (2000) atribui as seguintes competências ao CONAC:

- Estabelecer as diretrizes para a representação do Brasil em convenções, acordos, tratados e atos de transporte aéreo internacional com outros países ou organizações internacionais de aviação civil.
- Propor o modelo de concessão de infraestrutura aeroportuária, submetendo-o ao presidente da república.
- Aprovar as diretrizes de suplementação de recursos para linhas aéreas e aeroportos de interesse estratégico, econômico ou turístico.
- Promover a coordenação entre as atividades de proteção de voo e as atividades de regulação aérea.
- Aprovar o plano geral de outorgas de linhas aéreas.
- Estabelecer as diretrizes para a aplicabilidade do instituto da concessão ou permissão na exploração comercial de linhas aéreas.

Segundo a lei 11.182 (2005), combinada com a lei 12.462 (2011), cabe à ANAC adotar as medidas necessárias para o atendimento do interesse público e para o desenvolvimento e fomento da aviação civil, da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária do país, competindo-lhe as seguintes atribuições:

- Implementar, em sua esfera de atuação, a política de aviação civil.
- Realizar estudos, estabelecer normas, promover a implementação das normas e recomendações internacionais de aviação civil.

- Promover, junto aos órgãos competentes, o cumprimento dos atos internacionais sobre aviação civil ratificados pelo Brasil.
- Regular e fiscalizar a outorga de serviços aéreos.
- Conceder, permitir ou autorizar a exploração de serviços aéreos.
- Fiscalizar as aeronaves civis, seus componentes, equipamentos e serviços de manutenção, com o objetivo de assegurar o cumprimento das normas de segurança de voo.
- Proceder à homologação e emitir certificados, atestados, aprovações e autorizações, relativos às atividades de competência do sistema de segurança de voo da aviação civil, bem como licenças de tripulantes e certificados de habilitação técnica e de capacidade física e mental, observados os padrões e normas por ela estabelecidos.
- Regular as autorizações de horários de pouso e decolagem de aeronaves civis, observadas as condicionantes do sistema de controle do espaço aéreo e da infraestrutura aeroportuária disponível.
- Regular e fiscalizar as infraestruturas aeronáutica e aeroportuária, com exceção das atividades e procedimentos relacionados com o sistema de controle do espaço aéreo e com o sistema de investigação e prevenção de acidentes aeronáuticos.
- Conceder ou autorizar a exploração da infraestrutura aeroportuária, no todo ou em parte.
- Homologar, registrar e cadastrar os aeródromos.
- Expedir normas e estabelecer padrões mínimos de segurança de voo, de desempenho e eficiência, a serem cumpridos pelas prestadoras de serviços aéreos e de infraestrutura aeronáutica e aeroportuária, inclusive quanto a equipamentos, materiais, produtos e processos que utilizarem e serviços que prestarem.
- Expedir certificados de aeronavegabilidade.

- Expedir, homologar ou reconhecer a certificação de produtos e processos aeronáuticos de uso civil, observados os padrões e normas por ela estabelecidos.
- Reprimir infrações à legislação, inclusive quanto aos direitos dos usuários, e aplicar as sanções cabíveis.

Sobre a infraestrutura aeroportuária, o estatuto social da INFRAERO (2015) descreve que esta tem por finalidade implantar, administrar, operar e explorar industrial e comercialmente a infraestrutura aeroportuária e de apoio à navegação aérea, prestar consultoria e assessoramento em suas áreas de atuação e na construção de aeroportos, bem como realizar quaisquer atividades, correlatas ou afins, que lhe forem conferidas pela SAC.

Além daqueles aeroportos sob o total controle da INFRAERO, outros são concedidos à iniciativa privada por meio de contratos que preveem a devolução ao Estado dos bens e serviços ao fim do período contratual ou em qualquer momento por interesse público. Atualmente no Brasil os aeroportos concedidos são os de Guarulhos (SP), Viracopos (SP), Brasília (DF), Confins (MG) e de São Gonçalo do Amarante (RN).

Por fim, o DECEA, vinculado à Força Aérea Brasileira (FAB), tem por objetivo planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas ao controle e gerenciamento do espaço aéreo, serviço de navegação, à proteção ao voo e ao serviço de busca e salvamento.

Segundo o RBAC-01 (2011), controle de tráfego aéreo significa um serviço operado pela autoridade competente visando promover um fluxo de tráfego aéreo seguro, ordenado e rápido.

2.1.2 Operadores aéreos

Por operador aéreo, pode-se entender como uma pessoa jurídica que transporta pessoas e/ou cargas, mediante pagamento, entre dois aeródromos distintos e podem ser classificados como regulares ou não regulares. Os operadores regulares são aqueles que possuem HOTRAN; ou seja, já existe uma aprovação da ANAC que formaliza as concessões para a exploração de linhas aéreas internacionais e domésticas de passageiros e/ou cargas e da rede postal pelas empresas de transporte aéreo, com os respectivos horários, números de voos, frequências, tipos de aeronaves e assentos disponíveis (IAC-1223, 2000). Alguns

exemplos de operadores regulares que voam no Brasil são TAM, GOL, AZUL, AVIANCA, PASSAREDO, TAP, *American Airlines* etc. Os operadores não regulares são aqueles que não possuem HOTRAN aprovado (Ex: táxi aéreo, aviação particular, aviação agrícola etc).

As tabelas a seguir foram extraídas do Anuário do Transporte Aéreo (2013), emitido pela ANAC, e apresentam dados que possibilitam um melhor entendimento sobre o mercado das companhias aéreas nacionais.

A Tabela 2.1 apresenta o quantitativo de aeronaves das companhias aéreas nacionais com base no ano de 2013. No total, a indústria possui 563 aeronaves, sendo 203 delas da TAM e 147 da GOL. Outro dado importante refere-se à participação dos fabricantes de aeronaves. A europeia *Airbus* possui 210 aeronaves operando no Brasil, enquanto que a fabricante americana *Boeing* possui 183 aeronaves. A AZUL é a companhia aérea que opera com a maior quantidade de aeronaves fabricadas pela brasileira Embraer, que totalizam 82.

Tabela 2.1: Quantitativo de aeronaves por companhia aérea brasileira no ano de 2013

Empresa	Airbus	ATR	Boeing	Cessna	Embraer	Fokker	Total geral
AZUL	0	14	0	0	42	0	56
GOL	0	0	147	0	0	0	147
AVIANCA	26	0	0	0	0	12	38
MAP	0	4	0	0	0	0	4
PASSAREDO	0	9	0	0	0	0	9
TAM	184	0	19	0	0	0	203
RIO	0	0	7	0	0	0	7
SETE	0	0	0	5	2	0	7
TRIP	0	41	0	0	38	0	79
TOTAL	0	3	5	0	0	0	8
ABSA	0	0	5	0	0	0	5
Indústria	210	71	183	5	82	12	563

Fonte: ANAC (2013)

Quanto à participação das companhias aéreas no transporte de passageiros, a Tabela 2.2 mostra que a GOL representa 36,1% do mercado e a TAM 35,4%. No ano de 2013, a AZUL e a TRIP ainda não haviam sido fundidas e, juntas, representavam 20,7% do mercado.

Tabela 2.2: Participação das cinco maiores companhias aéreas brasileiras em passageiros pagos durante o ano de 2013

Empresa	Passageiros Pagos Transportados
GOL	36,1%
TAM	35,4%
AZUL	14,8%
TRIP	5,9%
AVIANCA	6,6%
Outras	1,1%

Fonte: ANAC (2013)

A Tabela 2.3 representa as funções básicas e o quantitativo de empregados que compõem a indústria das companhias aéreas regulares no Brasil entre os anos de 2010 e 2013. É possível observar que o quantitativo de 2013 sofreu uma retração de funcionários em relação aos anos de 2011 e 2012. A Tabela 2.4 é complementar e mostra que, apesar de possuir uma participação maior no mercado, no ano de 2013 a GOL possuía 16.183 empregados enquanto que a TAM contava com 27.760.

Tabela 2.3: Quantidade de empregados por tipo de função nas companhias aéreas brasileiras entre os anos de 2010 e 2013

Tipo de Pessoal	2010	2011	2012	2013
Pilotos e Co-pilotos [1]	5.814	6.394	6.371	5.698
Demais tripulantes técnicos [2]	154	596	42	36
Auxiliares de voo [3]	11.856	12.366	11.996	11.059
Pessoal de manutenção e revisão [4]	6.998	8.255	8.023	8.438
Pessoal de tráfego e vendas [5]	13.676	8.655	9.151	11.177
Outras [6]	17.392	25.425	25.537	23.416
Indústria	55.890	61.691	61.120	59.824

Fonte: ANAC (2013)

Tabela 2.4: Quantidade de empregados por companhia aérea brasileira no ano de 2013

Empresa	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	Total
AZUL	858	0	1.289	997	3.407	1.653	8.204
GOL	1.594	0	3.250	2.621	4.941	3.777	16.183
AVIANCA	367	0	642	566	361	1.728	3.664
MAP	17	0	16	14	17	21	85
PASSAREDO	94	1	94	108	306	88	691
TAM	2.019	0	5.205	3.389	1.957	15.190	27.760
RIO	72	27	0	60	0	115	274
SETE	40	0	11	0	65	60	176
TRIP	533	0	535	554	1	53	1.676
TOTAL	31	8	17	51	0	68	175
ABSA	73	0	0	78	122	663	936
Indústria	5.698	36	11.059	8.438	11.177	23.416	59.824

Fonte: ANAC (2013)

Existe a máxima na indústria da aviação segundo a qual as companhias aéreas precisam investir em segurança mas também devem gerar lucros. Segundo Melchers (2001), o conceito de ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) é amplamente empregado no gerenciamento de risco que deve ser tão baixo quanto praticável. Há um momento a partir do qual o esforço financeiro não justifica a redução mínima do risco.

A Tabela 2.5 mostra que a 85,49% das receitas das companhias brasileiras no ano de 2013 foram oriundas do transporte de passageiros e 8,29% do transporte de cargas. Em contrapartida, a Tabela 2.6 apresenta a composição básica dos custos das empresas aéreas e mostra que consumo de combustível tem uma representatividade de 37,30%.

Devido à expressiva participação do consumo do combustível na matriz de custos das companhias aéreas, muitas delas adotam medidas para realizar economias. Como exemplo, é possível mencionar os procedimentos de potência reduzida dos motores no maior tempo possível durante o pouso, movimentação das aeronaves no chão com apenas um dos motores acionados e utilização de fontes elétricas externas durante o tempo dos serviços em solo.

Tabela 2.5: Composição das receitas das companhias aéreas brasileiras no ano de 2013

Passagens	85,49%
Fretamento	0,90%
Mala postal e rede postal noturna	1,69%
Carga	8,29%
Outros	3,64%
Total	100,00%

Fonte: ANAC (2013)

Tabela 2.6: Composição dos custos das companhias brasileiras no ano de 2013

Custo com tripulação	9,64%
Custo com combustíveis	37,30%
Custo com depreciação de equipamentos de voo	3,70%
Custo com arrendamento, manutenção e seguro das aeronaves	16,96%
Custo com tarifas aeroportuárias	2,53%
Custo com tarifas de navegação aérea	3,42%
Custos indiretos	8,80%
Despesas administrativas gerais	7,28%
Outras despesas operacionais	10,36%

Fonte: ANAC (2013)

Para os diferentes tipos de operadores aéreos, regulares e não regulares, existem exigências regulamentares específicas por parte da ANAC. Essas exigências estão distribuídas no CBA, nos RBAC e RBHA, nas Instruções Suplementares (IS), nas IAC etc. Essas normas encontram-se em diferentes hierarquias jurídicas. De maneira simplificada, os operadores aéreos regulares são regidos pelo RBAC-121 (2010) e os operadores não regulares pelos RBHA-91 (2011) e RBAC-135 (2010).

Para que um operador aéreo possa funcionar, é preciso que ele receba uma concessão ou autorização para prestação de serviços públicos de transporte aéreo de pessoas e/ou cargas e malotes postais conforme prescrito no CBA.

Mais especificamente para os operadores regulares, o RBAC-121 (2010) exige que, para operações domésticas, devem demonstrar que cada rota é apoiada em aeródromos em quantidade e qualidade adequadas, considerando aspectos como dimensões, resistência e superfície das pistas, obstruções, facilidades, proteção ao público (*security*), sinalização e auxílios luminosos, auxílios à navegação e aproximação, comunicação, horário de funcionamento e controle de tráfego.

Ao estabelecer os horários programados dos voos previstos no HOTRAN, os ope-

radores aéreos regulares devem alocar tempo suficiente no solo para atendimento apropriado da aeronave nos pousos intermediários. Esse atendimento compreende, por exemplo, embarque e desembarque de passageiros, troca de tripulantes, manipulação das bagagens, inspeções quanto ao estado geral da aeronave, abastecimento com combustível, suprimento de alimentos, limpeza etc.

Adicionalmente, o RBAC-121 (2010) ainda exige que operadores aéreos regulares possuam pessoal competente e instalações e equipamentos adequados (incluindo peças de reposição, suprimentos e materiais) disponíveis em aeródromos específicos ao longo de cada uma de suas rotas, de acordo com as necessidades, de modo a prover serviços adequados de atendimento no solo, manutenção corretiva e preventiva nas aeronaves e nos equipamentos auxiliares.

2.1.3 Gestão das interrupções no setor aéreo

Quando um operador aéreo regular tem as suas operações interrompidas, ou seja, deixa de realizar um voo ou um conjunto de voos previstos, pode comprometer a execução dos voos planejados seguintes e prejudicar os itinerários dos passageiros. Como forma de minimizar esses impactos negativos, é importante que as companhias aéreas estejam preparadas para os imprevistos e possuam um plano eficiente de gestão das interrupções (Clausen et al, 2010).

Por gestão de interrupções, Kohl et al (2007) apontam os seus três principais objetivos:

- Cumprir o contrato de transporte firmado entre a companhia aérea e o passageiro. Isso representa, no mínimo, deixá-lo no destino final juntamente com as suas bagagens em perfeitas condições.
- Reduzir os custos operacionais ocasionados pelas interrupções.
- Possibilitar a retomada das operações normais o mais rápido possível.

Para melhor administrar as interrupções, normalmente as companhias aéreas possuem um Centro de Controle de Operações (CCO), o qual é tipicamente composto por

grupos de profissionais experientes que tratam sobre o despacho de voo, controle das aeronaves, controle dos tripulantes, serviços de manutenção e serviços aos passageiros. As atribuições dessas equipes são caracterizadas por Kohl et al (2007):

- Despacho de voo: prepara os planos de voo e solicita novos *slots* de voos aos órgãos que controlam o espaço aéreo.
- Controle de aeronaves: gerencia a disponibilidade das aeronaves. Em situações de interrupções, procura minimizar os impactos alterando as rotas das aeronaves e itinerários dos passageiros, aglutinando diferentes voos etc. Normalmente utilizam sistemas informatizados para o acompanhamento das aeronaves.
- Controle de tripulantes: gerencia a disponibilidade e as escalas dos pilotos, copilotos, comissários, atendentes etc, para a execução dos voos demandados pela companhia aérea.
- Serviços de manutenção: responsáveis pelo acompanhamento da manutenção das aeronaves (programada ou não programada). Caso seja preciso, interferem nas rotas das aeronaves como forma de garantir a realização das manutenções necessárias nos diferentes aeroportos operados pela companhia.
- Serviços aos passageiros: nos casos de cancelamentos e/ou atrasos dos voos, são encarregados pela gestão da acomodação dos passageiros em outros voos e também pelo apoio material, caso necessários.

O CCO normalmente funciona todos os dias da semana e durante 24h por dia como forma de garantir a solução mais adequada nas situações que exijam ações de contingência e, segundo Castro e Oliveira (2011), ele segue a rotina a seguir:

- Monitoramento das aeronaves, tripulantes, passageiros e cargas.
- Analisa se alguma ação é necessária após algum tipo de interrupção. Em caso negativo, mantém o monitoramento.

- Em caso de necessidade de ações e tendo as informações do problema, o CCO desenvolve as soluções candidatas. Em primeiro lugar, o problema da aeronave é resolvido. Em seguida, o problema da tripulação e depois o problema dos passageiros.
- A decisão sobre as ações são tomadas.
- O plano operacional é atualizado.

A antecipação das soluções como forma de possibilitar o menor número de cancelamentos e atrasos dos voos é fundamental, tendo em vista que esses eventos indesejáveis acarretam custos adicionais às companhias, conforme exemplificados por Castro e Oliveira (2011):

- Tripulação: custos fixos relativos à salário, horas adicionais, dias perdidos, despesas com hotel e alimentação, despesas com deslocamento de equipe extra etc.
- Aeronave: custo relativo à estacionamento no hangar do aeroporto, os custos dos serviços de limpeza, manutenção de rotina, custos fixos relativos aos profissionais de manutenção etc.
- Passageiros: disponibilização de comunicação, refeições, hospedagem, deslocamentos, compensações etc. No âmbito nacional, a resolução 141 (2010) prevê o apoio aos passageiros em situação de atrasos e cancelamentos dos voos e também preterições de embarque.

Como forma de monitorar a eficiência dos serviços prestados pelas companhias aéreas, e por conseguinte a capacidade de resposta em momentos de interrupções das operações, a IAC-1502 (1999) instituiu os índices de regularidade, de pontualidade e de eficiência operacional, os quais são emitidos diariamente em relatórios e disponibilizados no *site* da ANAC para consultas.

A referida IAC traz os seguintes conceitos sobre os índices apresentados:

- Índice de Regularidade: a proporção do total de etapas de voo previstas em HO-TRAN que foram efetivamente realizadas.

- Índice de Pontualidade: a proporção das etapas de voo que foram operadas de acordo com os horários previstos nos respectivos documentos de HOTRAN dentre o total de etapas de voo efetivamente realizadas, considerando-se os limites de tolerância estabelecidos na presente IAC.
- Índice de Eficiência Operacional: corresponde à ação combinada da regularidade e da pontualidade, representando, de um modo geral, a probabilidade de o passageiro, chegando ao aeroporto, realizar o voo dentro do horário previsto.

O GDP é outro exemplo governamental que visa contribuir para a diminuição dos efeitos negativos nos momentos de interrupções das operações. Instituído pela *Federal Aviation Administration* (FAA), o seu objetivo é prover uma melhor administração do fluxo dos pousos e decolagens nos aeroportos dos EUA afetados por mau tempo.

2.2 OTIMIZAÇÃO NA AVIAÇÃO CIVIL

A Pesquisa Operacional (PO) é a aplicação de métodos científicos em problemas complexos para auxiliar no processo de tomada de decisões, tais como projetar, planejar e operar sistemas em situações que requeiram alocações eficientes de recursos escassos (Batalha, 2008).

Segundo o mesmo autor, no âmbito da Engenharia de Produção, a PO tem sido aplicada principalmente nas atividades de produção e logística. Alguns exemplos são os problemas relacionados ao projeto da rede logística, localização de instalações e facilidades, gestão de estoques de produtos na rede e *layout* de armazéns, dimensionamento de frota de veículos, roteamento e programação de veículos, logística reversa etc.

Para Arenales et al (2007), a partir de observações de fenômenos, processos ou sistemas físicos, químicos, biológicos, econômicos, é possível extrair princípios básicos que os regem. Esses princípios, se passíveis de serem descritos por relações matemáticas, dão origem aos modelos matemáticos.

Em geral, para formular um modelo matemático, simplificações razoáveis do sistema ou problema real precisam ser considerado. Com isso, o modelo matemático significa

uma simplificação do problema real e deve ser suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema, mas suficientemente tratável por métodos de resolução existentes.

Em PO, não se tem uma única técnica para resolver todos os modelos matemáticos que podem surgir na prática. Em vez disso, o tipo e a complexidade do modelo matemático é quem determinam a natureza do método de solução (Taha, 2008).

Uma das técnicas mais utilizadas em PO é a programação linear. Ela é aplicada a modelos cujas funções objetivos e restrições são lineares. Quando as variáveis assumem valores inteiros, ela é chamada de Programação Linear Inteira (PLI).

Alguns modelos matemáticos podem ser tão complexos que é impossível resolvê-los por algoritmos de otimização já conhecidos. Nesses casos, pode ser necessário abandonar a busca de uma solução ótima e procurar uma boa solução usando heurísticas ou regras práticas (Taha, 2008).

Muitos esforços têm sido feitos na busca de heurísticas eficientes para os diversos problemas. Entretanto, a maioria delas são específicas para um problema particular, não sendo eficientes (ou mesmo não aplicáveis) na resolução de uma classe mais ampla de problemas.

Segundo Souza (2008), como forma de dar maior amplitude na resolução dos problemas reais, aplicam-se as metaheurísticas que são de caráter geral e destinadas a encontrar uma boa solução, eventualmente a ótima, consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada a qual deve ser modelada para cada problema específico. Dentre os procedimentos enquadrados como metaheurísticas que surgiram ao longo das últimas décadas, destacam-se: Algoritmos Genéticos, Redes Neurais, Colônia de Formigas, Busca Tabu, *Simulated Annealing*, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, *Iterated Local Search* etc.

Assim como nas diversas atividades econômicas, a PO também está presente no ramo da aviação civil. Alguns problemas típicos de otimização da programação das companhias aéreas são apresentados por Belobaba et al (2009) e têm como objetivo, em geral, minimizar os custos e reduzir o emprego dos recursos:

- *Schedule Design Problem* (SDP): consiste na determinação dos voos a serem realizados pela companhia aérea. Cada voo tem o seu aeroporto de origem, de destino, horário de saída, tempo de voo e frequência de realização durante a semana.
- *Fleet Assignment Problem* (FAP): reside na determinação dos tipos de aeronaves a serem operados nos diferentes voos em função do número de assentos disponíveis e demanda por passageiros.
- *Maintenance Routing Problem* (MRP): baseia-se na determinação dos sequenciamentos das aeronaves de forma a permitir que elas cumpram as manutenções periódicas e estejam operacionalmente disponíveis para a execução dos voos seguintes.
- *Crew Scheduling Problem* (CSP): fundamenta-se na determinação das escalas de trabalho dos pilotos, co-pilotos e comissários de forma a executarem os voos e preservarem os seus limites de tempo de trabalho e de descanso.

A *Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies* (AGIFORS) é uma sociedade profissional dedicada ao avanço e aplicação da PO na aviação civil. Essa associação é composta por profissionais da indústria aeronáutica interessados na resolução dos problemas do setor aéreo.

Atualmente os membros da AGIFORS ultrapassam 1200 profissionais e representam mais de 200 companhias aéreas, fabricantes aeronáuticos e indústrias relacionadas à aviação e associações e a cada ano promove encontros como forma de apresentar e discutir os estudos divididos nas seguintes áreas:

- Estratégia e programação.
- Gerenciamento de receitas.
- Gestores operacionais.
- Gerenciamento de tripulação.
- Operações aéreas.

Todo o esforço das companhias aéreas em otimizar a programação dos seus voos, aeronaves a serem empregadas, planejamento da manutenção e programação da escala dos tripulantes, pode ser comprometido por eventos indesejáveis ou imprevisíveis, que provocam interrupções nas suas operações.

Após a ocorrência de interrupções, a depender da sua abrangência e também do tempo que persiste, podem impedir o cumprimento dos voos programados e gerar grandes prejuízos financeiros às empresas aéreas.

Na literatura disponível, o conjunto de problemas a serem resolvidos pelas companhias aéreas, em situações de interrupções, e de maneira racional e quantificável como forma de “recuperarem” as suas operações o mais rápido possível e com o menor custo total, é tratado como *Airline Recovery Problem*.

Segundo Lucena e Pontes (2007), a maioria dos problemas encontrados na indústria da aviação comercial, em áreas como alocação de pessoal e alocação de aeronaves, é classificada como NP-difíceis e usualmente requerem uma abordagem heurística para a sua solução.

O *Airline Recovery Problem* é composto basicamente por 3 subproblemas: *Aircraft Recovery Problem*, *Crew Recovery Problem* e *Passenger Recovery Problem* (Belobaba et al, 2009). Esses subproblemas podem ser tratados isoladamente ou integrados uns aos outros.

A resolução de cada um dos subproblemas tem como finalidade possibilitar o cumprimento dos voos planejados com o menor número de atrasos e cancelamentos, incidir o menor custo para companhia aérea e retomar as operações normais o mais rápido possível. O ARP trata do insumo aeronave, o CRP do insumo tripulação e o PRP da acomodação e assistência aos passageiros.

Os primeiros trabalhos sobre a recuperação aérea foram desenvolvidos por Teodorović e Guberinić (1984) com ênfase no problema de recuperação de aeronaves.

O estudo de Nickkar et al (2015) baseou-se na resolução do ARP e PRP e utilizou como método de resolução a decomposição *Dantzig-Wolfe* e heurística langragiana.

O problema do ARP foi abordado por Hu et al (2015) e empregaram a metodologia da construção da rede tempo-espaço com bandas de 30 min e a resolução do problema por

meio de PLI. Para esse estudo foram utilizados dados de uma grande companhia aérea chinesa e geradas instâncias que previam a indisponibilidade de até 10 aeronaves. Os resultados foram obtidos dentro de um tempo de processamento de até 30 segundos e foram melhores do que as soluções conseguidas pela companhia aérea em situações reais.

Guimarans et al (2015) trataram do ARP, CRP e PRP e utilizaram uma *Large Neighborhood Search* combinada com simulação em situações reais de interrupções e também instâncias de uma companhia aérea espanhola.

O autor Maher (2014a) também abordou os 3 subproblemas do *Airline Recovery Problem* usando como método a geração de colunas e concluiu que a recuperação dos passageiros diminuiu consideravelmente os custos operacionais das companhias aéreas.

Para Arıkan et al (2013), os problemas do ARP e PRP foram abordados de maneira não linear devido à não linearidade da função de custo do consumo de combustível pelas aeronaves. Segundo essa metodologia, uma das formas de minimizar os atrasos seria o aumento da velocidade de cruzeiro das aeronaves em operação.

O ARP, CRP e PRP foram abordados por Petersen et al (2012), que utilizaram o método da geração de colunas aplicáveis a uma companhia aérea regional dos EUA, o qual opera 800 voos diários com 2 tipos de aeronaves. O estudo mostrou-se eficiente quando as interrupções não foram superiores a 65% dos voos previstos num dia.

Para a situação que integra simultaneamente a recuperação de aeronaves e passageiros, Bisailon et al (2011) empregaram uma *Large Neighbourhood Search* para resolver o problema e testaram em 2009 o algoritmo em 18 instâncias dentro da competição conhecida como ROADEF *Challenge*, obtendo a primeira colocação. Essa metodologia consistiu na construção de uma solução inicial, seguida de melhorias até que o algoritmo não mais retornasse uma solução melhorada em relação às anteriores.

Para Bard et al (2001), o problema do ARP pode ser tratado a partir da construção de uma rede tempo espaço com bandas de tempo como uma variação do problema de fluxo de custo mínimo. Foram empregados dados da *Continental Airlines* com geração de 427 instâncias simulando a indisponibilidade de até 5 aeronaves. A resolução do problema foi via PLI e para banda de 5 min a diferença entre a solução encontrada e a ótima foi de 5%

para 97% das instâncias testadas. O trabalho de Bard et al (2001) é complementar ao de Arguello et al (1997), tendo em vista que este emprega uma GRASP para a resolução do ARP em companhias de maior porte.

Além das diferentes formas de modelagem matemática para o *Airline Recovery Problem* e seus subproblemas, existem variações também nas técnicas empregadas para a sua resolução. A Tabela 2.7 é uma adaptação de Castro e Oliveira (2011) e sumariza alguns estudos relacionados ao *Recovery Problem*. Apesar dessa tabela destacar apenas os estudos relacionados à recuperação dos principais insumos das companhias aéreas em situações de interrupções (aeronaves e tripulantes), ou até mesmo o acoplamento de ambos, muitos desses autores também têm abordado o PRP.

O caminho natural dos estudos tem sido o acoplamento dos subproblemas de recuperação relacionados às aeronaves, tripulantes, passageiros e até mesmo programação da manutenção. Muitos autores têm buscado a resolução de problemas maiores por meio de técnicas de otimização que permitam uma resposta em tempo reduzido.

O foco do presente estudo está no emprego de uma técnica exata de otimização do ARP. Sendo a aeronave o principal elemento para a operação dos voos, é importante que a preocupação principal e inicial recaia sobre a melhor gestão desse insumo, pois nem sempre os estudos atualmente apresentados são dedicados e claros suficientemente para generalizações.

Tabela 2.7: Resumo dos autores que pesquisaram sobre o *Airline Recovery Problem*

Autor	Ano	Técnica	Aeronave	Tripulação	Integrado
Hu et al.	2015	PLI	✓		
Nickkar et al.	2015	Decomposição Dantzig-Wolfe e heurística Langragiana	✓		
Guimarans et al.	2015	<i>Large Neighbourhood Search</i> e simulação	✓	✓	✓
Maher et al.	2014	Abordagem de geração de colunas	✓	✓	✓
Arikan et al.	2013	Programação não linear	✓		
Petersen et al.	2012	Metaheurística geração de colunas	✓	✓	✓
Bisaillon et al.	2010	<i>Large Neighbourhood Search</i>	✓	✓	✓

Continua na próxima página

Tabela 2.7: (*Continuação*)

Autor	Ano	Técnica	Aeronave	Tripulação	Integrado
Abdelghany et al.	2008	Programação Inteira Mista			✓
Zhang & Hansen	2008	Programação Inteira com função objetivo não-linear			✓
Mei Yang	2007	Busca Tabu	✓		
Zhao & Zhu	2007	<i>Grey programming</i> ; heurística de busca local	✓		
Eggenberg et al.	2007	Particionamento de conjuntos	✓		
Zhao et al.	2007	<i>Grey programming</i> ; Busca local		✓	
Castro & Oliveira	2007	<i>Hill Climbing</i> ; <i>Simulated annealing</i>		✓	
Medard & Sawhney	2007	Modelo de cobertura de conjuntos		✓	
Liu et al.,	2006/8	Algoritmo genético com multi objetivo	✓		
Bratu & Barnhart	2006	Rede de programação de voos			✓
Andersson	2006	Busca Tabu; <i>Simulated Annealing</i>	✓		
Nissen & Haase	2006	<i>Branch-and-price</i>		✓	
Stojkovic & Soumis	2005	Algoritmo de fluxo em redes		✓	
Love et al.	2005	Metaheurísticas	✓		
Andersson & Varbrand	2004	Relaxação Lagrangeana; Decomposição Dantzig-Wolfe	✓		
Abdelgahny et al.,	2004	Programação Inteira Mista		✓	
Guo	2004	Problema de particionamento de conjuntos; Relaxação LP		✓	
Kohl et al.,	2004	Solver para o problema de aeronaves; solver para o problema de tripulantes; solver para o problema de passageiros			✓
Yu et al.	2003	Busca em profundidade; solver para o problema de tripulantes		✓	
Rosenberger et al.,	2003	Modelo de particionamento; Heurística de pré-processamento; CPLEX 6.0	✓		
Andersson	2001	Rede de programação de voos			✓
Bard et al.	2001	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Thengvall et al.	2001/3	Programação Inteira Mista	✓		
Stojkovic & Soumis	2001	Algoritmo de fluxo em redes		✓	
Lettovsky et al.	2000	Relaxação LP; <i>Branch-and-Bound</i>		✓	
Thengvall et al.	2000	Programação Inteira	✓		
Luo & Yu	1998	Problema de alocação de recursos	✓		
Stojkovic et al.	1998	Programação Inteira Mista; <i>branch-and-bound</i>		✓	
Lettovsky	1997	Programação Inteira Mista			✓
Wei et al.	1997	Algoritmo de fluxo em redes		✓	
Arguello et al.	1997	GRASP	✓		
Luo & Yu	1997	Problema de alocação de recursos	✓		

Continua na próxima página

Tabela 2.7: (*Continuação*)

Autor	Ano	Técnica	Aeronave	Tripulação	Integrado
Cao & Kanafani	1997	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Yan & Tu	1997	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Clarke	1997	Heurística busca em árvore	✓		
Yan & Yang	1996	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Talluri	1996	Classificação por oportunidades de trocas	✓		
Mathaisel	1996	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Teodorovic & Stojkovic	1995	Heurística	✓		
Johnson et al.	1994	Programação inteira mista		✓	
Jarrah et al.	1993/6	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Rakshit et al.	1993/6	Algoritmo de fluxo em redes	✓		
Teodorovic & Stojkovic	1990	Heurística	✓		
Teodorovic & Guberinic	1984	Heurística	✓		

Fonte: Adaptado de Castro e Oliveira (2011)

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O Brasil reconhece e implementa as diretrizes emanadas da OACI como forma de promoção da segurança e qualidade da sua aviação civil.

O sistema de aviação civil brasileiro, segundo o CBA, é composto basicamente pelos operadores aéreos regulares e não regulares, indústria aeronáutica, infraestrutura aeroportuária e espaço aéreo. Para o caso dos aeroportos, atualmente esses podem ser geridos pela INFRAERO ou concedidos os seus controles à iniciativa privada. Para o caso do espaço aéreo, cabe menção que o seu controle é realizado pela FAB.

Os operadores aéreos no Brasil são classificados como regulares e não regulares. Os classificados como não regulares são aqueles que não possuem HOTRAN aprovado pela ANAC e os regulares são aqueles que operam segundo um HOTRAN.

A GOL, TAM e AZUL são as três maiores companhias aéreas brasileiros em termos de quantidade de aeronaves, número de empregados e transporte de passageiros. As empresas PASSAREDO, MAP, RIO, SETE, TOTAL e ABSA podem ser classificadas como companhias aéreas de pequeno porte, conforme dados apontados nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.4.

É importante que as empresas aéreas regulares estejam preparadas para lidar com

situações de interrupções que inviabilizem as suas operações normais. Assim, a gestão de interrupções tem como objetivos centrais o cumprimento do contrato de transporte firmado com os passageiros, redução dos custos operacionais adicionais ocasionados pelas interrupções e retomada das operações normais o mais rápido possível.

Como forma de auxiliar no apoio à decisão das companhias aéreas em situações de interrupções, sobretudo no que se refere ao novo sequenciamento das aeronaves pertencentes à frota, reorganização da escala dos tripulantes e acomodação dos passageiros, diversos autores têm empregado diferentes técnicas de otimização para a resolução do ARP, CRP e PRP.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos sobre o problema de fluxo de custo mínimo, as principais definições que envolvem o ARP, o modelo matemático adotado e as suas considerações.

Seja $G = (M, A)$ uma rede orientada por um conjunto M de n nós e o conjunto A de m arcos orientados. Cada arco $(i, j) \in A$ tem um custo associado c_{ij} que representa o custo por unidade de fluxo naquele arco. Cada arco $(i, j) \in A$ tem associado uma capacidade mínima de fluxo L_{ij} através de (i, j) e capacidade máxima de fluxo U_{ij} através de (i, j) . O valor b_i representa o suprimento/demanda dos nós i e o valor x_{ij} o fluxo entre os nós i e j (Taha, 2008).

Função Objetivo

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in M} x_{ij} - \sum_{k \in M} x_{ki} = b_i, \quad \forall i \in M \quad (3.2)$$

$$L_{ij} \leq x_{ij} \leq U_{ij} \quad (3.3)$$

A função objetivo (3.1) busca minimizar o custo total na rede. As restrições (3.2) satisfazem as exigências de cada nó quanto ao fluxo de entrada e saída enquanto as restrições (3.3) impõem os limites inferior e superior de fluxo através dos arcos.

O problema de fluxo de custo mínimo busca atender os requisitos dos nós num custo mínimo, sendo conhecido o custo por unidade de fluxo e a capacidade associada em cada arco. Esse problema tem diversas aplicações práticas como: operação de uma rede de distribuição, gerenciamento de detritos sólidos, operações de uma rede de fornecimento, gerenciamento de fluxo de dinheiro, coordenação de misturas de produtos em plantas etc.

Como exemplo, uma companhia aérea necessita transportar mercadorias dos nós 1 e 2 para os nós 5, 6 e 7, conforme Figura 3.1, mas não possui voos diretos entre os nós de origem e os nós de destino e necessariamente precisa passar pelos nós 3 e 4. Os números externos aos nós representam o suprimento/demanda em toneladas e os números nos arcos representam os custos por unidade de tonelada transportada. Neste problema, o interesse é determinar o melhor caminho para transportar as mercadorias entre os nós de suprimento e os nós de demanda com o menor custo total. Existe a limitação que no nó 4 só entra ou sai no máximo 50 toneladas em mercadorias. Resolvendo o problema, a solução encontrada é aquela representada na Figura 3.2 e com um custo de \$1250.

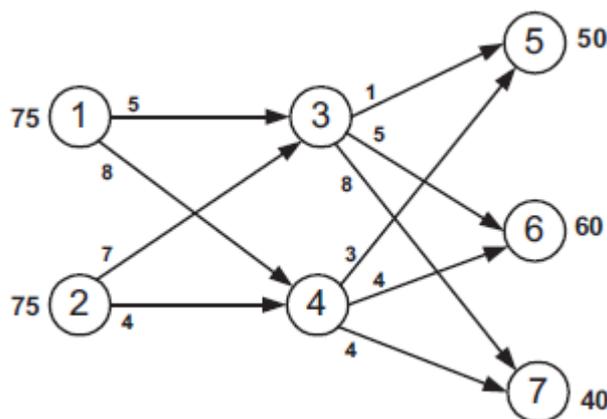


Figura 3.1: Representação da rede de fluxo de custo mínimo
Fonte: Bazargan (2010)

As companhias aéreas brasileiras que operam voos regulares planejam a sua malha a partir do estudo de demanda de passageiros nas diferentes cidades de interesse e definem, junto à ANAC, a quantidade de voos, os horários de pousos e decolagens, os modelos das

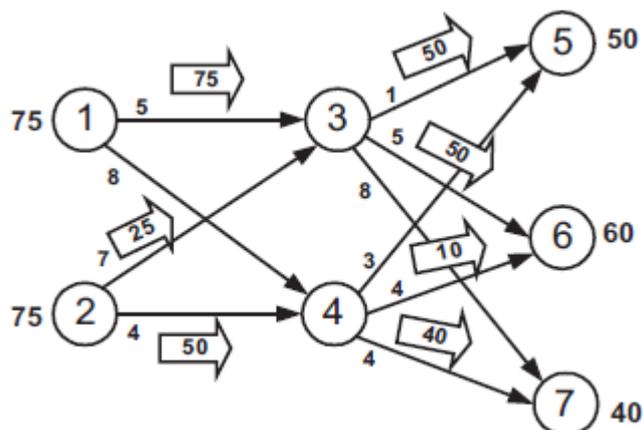


Figura 3.2: Solução para o fluxo de custo mínimo
Fonte: Bazargan (2010)

aeronaves que serão empregados e os aeroportos a serem operados. Essa definição não é exclusiva da ANAC, tendo em vista que também são analisados aspectos como instalações aeroportuárias e espaço aéreo.

Na aviação civil os custos operacionais são bastante elevados e as companhias aéreas procuram otimizar a máxima utilização da sua frota como forma de garantir receitas. Para cada aeronave disponível é atribuído um conjunto de voos que deve ser cumprido como forma de atender todos os voos previamente estabelecidos.

Cada aeronave possui um sequenciamento de voos a ser cumprido e sua operação é iniciada num determinado aeroporto, num dado instante de tempo, passando por outros aeroportos até concluir o seu planejamento no aeroporto de origem ou diferente deste. O aeroporto final do sequenciamento será a partir do qual a aeronave iniciará o seu novo planejamento de voos.

Ao longo dos sequenciamentos das aeronaves nos diferentes aeroportos, é preciso que entre dois voos consecutivos, realizados pela mesma aeronave, possuam um tempo mínimo em solo para que sejam efetuados os embarques e desembarques dos passageiros, troca de tripulação, carregamento e descarregamento das bagagens, abastecimento com combustível, limpeza, suprimento de alimentos, inspeções visuais pela equipe de manutenção etc. O tempo mínimo em solo é função basicamente do porte da aeronave e/ou da infraestrutura do aeroporto.

Apesar de todo o planejamento para o cumprimento de todos os voos no horário,

alguns deles atrasam ou até mesmo precisam ser cancelados. Diversos são os motivos que provocam interrupções nas operações. Como exemplo, é possível mencionar as falhas mecânicas nas aeronaves, fechamento de aeroportos devido ao mau tempo, congestionamento de aeroportos, problemas de segurança etc.

Para corrigir as interrupções nas operações, as companhias aéreas precisam ter respostas rápidas e eficazes como forma de minimizar os seus efeitos negativos. Nessas situações, usualmente os profissionais envolvidos na resolução do problema utilizam suas experiências e levam em conta a programação dos voos, roteamento das aeronaves, manutenção das aeronaves e informações sobre escala dos tripulantes para soluções simples com cada voo sendo considerado separadamente. Do ponto de vista prático isso pode ser uma boa alternativa, no entanto, pode acarretar em perdas financeiras ao não empregar ferramentas quantitativas de apoio à decisão.

Os custos relativos às interrupções das operações são devidos aos cancelamentos e/ou atrasos dos voos. Ao cancelar um determinado voo, além de deixar de lucrar com ele, as companhias aéreas precisam arcar com custos relativos aos passageiros, como alimentação, acomodação, transporte, remarcação de passagem etc. Também pode incidir custos fixos como pagamento de salário da tripulação, pessoal da manutenção, atendentes de aeroporto, taxas aeroportuárias, etc. Quanto ao custo por atraso, podem incidir custos relativos aos passageiros previstos em legislação, por horas extras dos tripulantes e funcionários, aumento no consumo de combustível etc.

A proposta do ARP consiste em determinar o novo sequenciamento das aeronaves da companhia aérea após a ocorrência de indisponibilidade de alguma (ou algumas) aeronave(s) em algum momento do dia, com os voos ocorrendo pontualmente ou com atrasos, e que resulte num menor custo total. O atraso dos voos pode ser por motivo inevitável, devido à indisponibilidade de aeronave, ou proposital, por ser vantajoso financeiramente. Algumas vezes o novo sequenciamento das aeronaves pode ser o mesmo que o originalmente programado ou pode ser alterado. A variável de decisão x_{ij} indica quais voos serão realizados. Além disso, a solução do ARP provê a informação sobre quais voos serão cancelados e, da mesma forma como ocorre com os voos atrasados, o cancelamento de um voo pode ser inevitável ou proposital. A variável de decisão y_k indica quais voos serão cancelados.

Tabela 3.1: Exemplo programação de voos

Aeronave	Número do Voo	Aeroporto de Origem	Aeroporto de Destino	Horário de Partida	Horário de Chegada
1	11	BOI	SEA	14:10	15:20
	12	SEA	GEG	16:05	17:00
	13	GEG	SEA	17:40	18:40
	14	SEA	BOI	19:20	20:35
2	21	SEA	BOI	15:45	17:00
	22	BOI	SEA	17:40	18:50
	23	SEA	GEG	19:30	20:30
	24	GEG	SEA	21:15	22:15
3	31	GEG	PDX	15:15	16:20
	32	PDX	GEG	17:30	18:30
	33	GEG	PDX	19:10	20:20
	34	PDX	GEG	21:00	21:55

Fonte: Bazargan (2010)

Por fim, a solução do ARP ainda provê a informação de quantas aeronaves e onde estarão localizadas, até o final do período de recuperação, como forma de dar continuidade às operações no dia seguinte. A variável de decisão z_i indica qual o aeroporto e a quantidade de aeronave.

A formulação matemática para o ARP, segundo metodologia adotada por Arguello et al (1998) e por Bard et al (2001), consiste na construção de uma rede tempo-espço, a partir do HOTRAN de uma companhia aérea brasileira, e da modelagem matemática que segue os princípios básicos do problema de fluxo de custo mínimo.

A rede tempo-espço representa a localização temporal e espacial das aeronaves e as alternativas de realização dos voos a fim de que possam cumprir a programação nos horários previamente programados e/ou mediante a necessidade devido indisponibilidade de aeronaves com atrasos. Essa rede é construída a partir dos horários de pousos e decolagens programados, aeroportos a serem operados, tempo mínimo necessário em solo e horário limite para pousos e decolagens nos aeroportos.

Como forma de exemplificar, a Figura 3.3 representa a rede tempo-espço construída a partir das informações contidas na Tabela 3.1. Os elementos básicos constitutivos dessa rede podem ser assim definidos:

- Eixo horizontal: conjunto de todos os aeroportos operados pela companhia aérea.

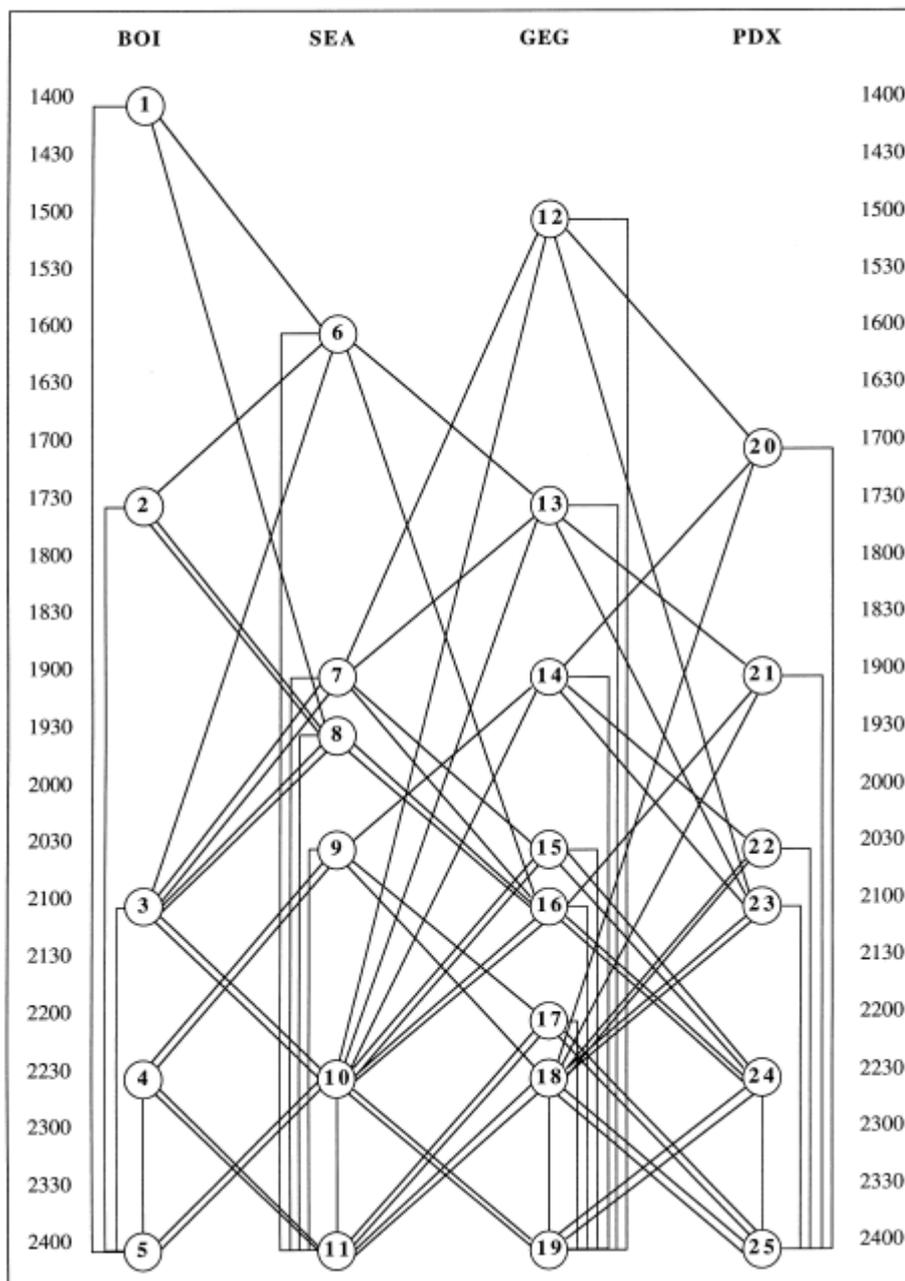


Figura 3.3: Rede tempo-espaco
Fonte: Bazargan (2010)

- Eixo vertical: discretização do tempo em intervalos fixos. Como no exemplo apresentado na Figura 3.3, os eventos de pousos e/ou decolagens nos aeroportos são avaliados a cada 30 minutos.
- Nó: representa a interseção entre um instante de tempo e a localização (aeroporto) em que podem ocorrer os eventos de pousos e/ou decolagens. A rede tempo-espaco é formada pelos conjuntos $i \in I$ e $j \in J$.

- Nós iniciais: representam os nós $i \in I$ onde ocorrem o primeiro evento de decolagem ou de pouso em cada aeroporto. No exemplo apresentado, os nós 1, 6 e 12 suprem inicialmente a rede com as aeronaves que irão cumprir os voos programados.
- Nós terminais: representam os nós $j \in J$ onde ocorrem os últimos eventos de pouso em cada aeroporto. No exemplo apresentado, os nós 5, 11 e 19 demandam aeronaves para darem continuidade às operações no dia seguinte.
- Nós intermediários: representam os nós $i \in I$ diferentes dos nós iniciais e dos nós terminais.
- Arcos de voos: são conexões entre os diferentes nós e representam as possibilidades de realização dos voos entre os nós i e j no horário ou com atraso.
- Arcos terminais: são conexões entre os diferentes nós iniciais/intermediários e os nós terminais e representam as possibilidades de uma dada aeronave localizada em $i \in I$ ser mantida no mesmo aeroporto como forma de suprir as operações no dia seguinte.
- Conservação de fluxo: a fim de que a companhia aérea possa cumprir todos os voos programados, é conservada a quantidade a_i de aeronaves no conjunto I e a quantidade h_i de aeronaves no conjunto J . Como no exemplo apresentado, os nós 1, 6 e 12 suprem aeronaves para o cumprimento dos voos programados e assim $a_i = 1$. Os nós 5, 11 e 19 demandam, cada um deles, de uma aeronave, $h_i = 1$, para que no dia seguinte as aeronaves possam dar início às operações. O restante dos nós conservam $a_i = 0$.

A seguir, é apresentado o modelo matemático definido partindo da construção da rede tempo-espaco, que se baseia fundamentalmente nos princípios do problema de fluxo de custo mínimo para a resolução do ARP via PLI.

Índices

$i, j =$ índices de nó.

$k =$ índice de voo.

Conjuntos

$F =$ Conjunto dos voos.

$I =$ Conjunto dos nós que originam um voo k .

$J =$ Conjunto dos nós destinos de um voo k .

$P_k =$ Conjunto dos nós originários do voo k .

$H_k^i =$ Conjunto dos nós destinos do voo k originário do nó $i \in I$.

$G_i =$ Conjunto dos voos originários do nó $i \in I$.

$L_i =$ Conjunto dos voos que terminam no nó $i \in J$.

$M_k^i =$ Conjunto dos nós de origens do voo k que terminam no nó terminal $i \in J$.

$Q_i =$ Conjunto dos nós que contêm arcos de suprimento para os nós terminais $i \in J$.

Dados

$a_i =$ Número de aeronaves disponíveis no nó $i \in I$.

$c_k =$ Custo do cancelamento do voo k .

$d_{ij}^k =$ Custo do atraso do voo k do nó i para o nó j .

$h_i =$ Número de aeronaves requeridas no nó terminal $i \in J$.

Variáveis

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se o voo } k \in F \text{ ocorrer entre os nós } i \text{ e } j \\ 0, & \text{se caso contrário} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{se o voo } k \in F \text{ é cancelado} \\ 0, & \text{se caso contrário} \end{cases}$$

$z_i =$ número de aeronaves nos nós terminais

Modelo Matemático

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in F} \sum_{i \in P_k} \sum_{j \in H_k^i} d_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in F} c_k y_k \quad (3.4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in P_k} \sum_{j \in H_k^i} x_{ij}^k + y_k = 1, \quad \forall k \in F \quad (3.5)$$

$$\sum_{k \in G_i} \sum_{j \in H_k^i} x_{ij}^k + z_i - \sum_{k \in L_i} \sum_{j \in M_k^i} x_{ij}^k = a_i, \quad \forall i \in I \quad (3.6)$$

$$\sum_{k \in L_i} \sum_{j \in M_k^i} x_{ij}^k + \sum_{j \in Q_i} z_j = h_i, \quad \forall i \in J \quad (3.7)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in F, i \in I \text{ e } j \in H_k^i \quad (3.8)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in F \quad (3.9)$$

$$z_i \in Z^+ \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

A expressão (3.4) representa a função objetivo do modelo proposto. O primeiro termo significa o somatório dos custos devido ao atraso dos voos k entre os nós i e j . O segundo termo significa o somatório dos custos devido ao cancelamento dos voos k . As expressões (3.5) a (3.10) são as restrições do modelo. As restrições (3.5) garantem que um determinado voo k ou é cancelado ou é realizado entre os nós i e j . As restrições (3.6) garantem o balanço de aeronaves no conjunto I e significam que o número de aeronaves num nó intermediário é igual a soma do número de voos que saem com o número de arcos de suprimento neste mesmo aeroporto, subtraído do número de voos que entram. As restrições (3.7) garantem o balanço de aeronaves no conjunto J e significam que o número de aeronaves num nó terminal é igual ao total de voos que entram e terminam neste nó, mais o número total de arcos de suprimento. Por fim, as restrições (3.8), (3.9) e (3.10)

determinam o domínio das variáveis de decisão.

A fim de facilitar a visualização das definições anteriormente, as figuras a seguir representam graficamente os conjuntos P_k , H_k^i , L_i , M_k^i , G_i e Q_i .

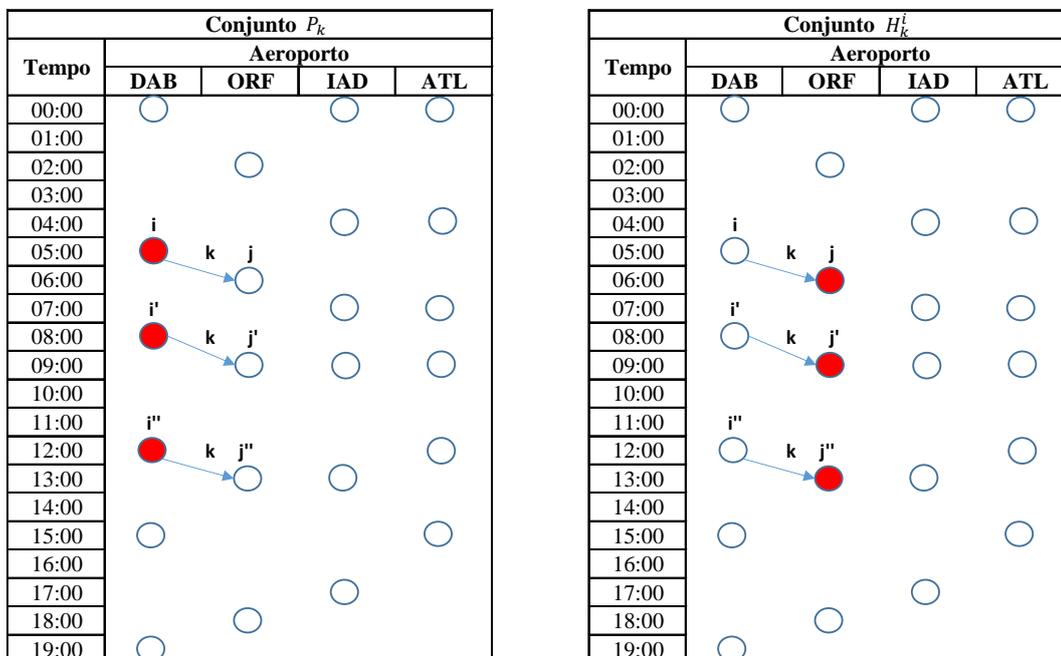


Figura 3.4: Representação esquemática dos conjuntos P_k e H_k^i
 Fonte: Próprio autor, 2015

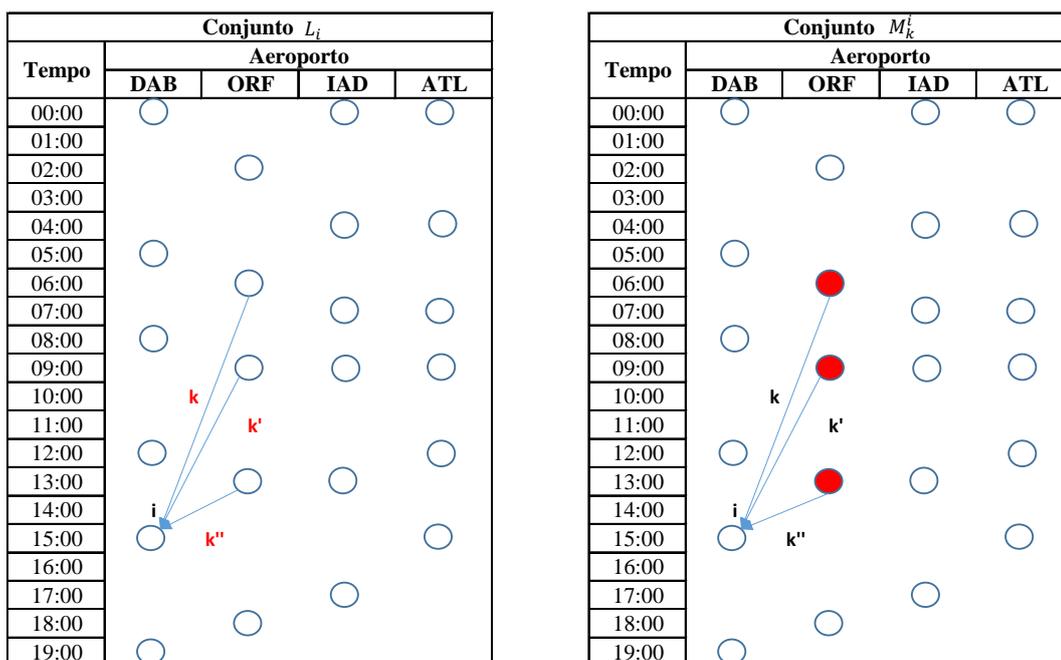


Figura 3.5: Representação esquemática dos conjuntos L_i e M_k^i
 Fonte: Próprio autor, 2015

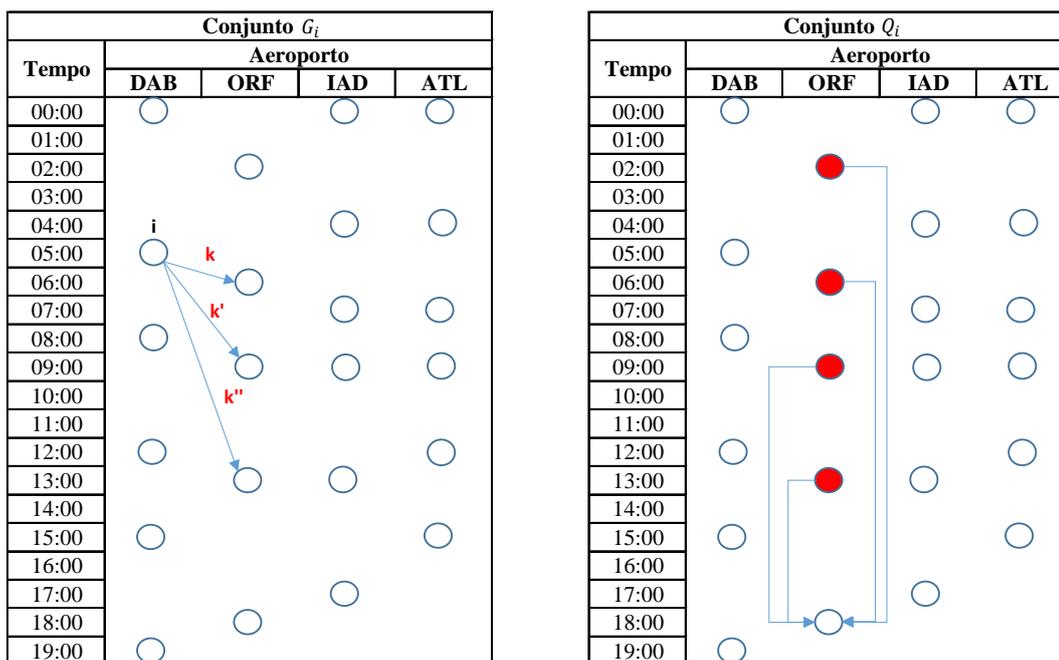


Figura 3.6: Representação esquemática dos conjuntos G_i e Q_i

Fonte: Próprio autor, 2015

As principais considerações sobre esta abordagem adotada são:

- Deve ser respeitado o tempo mínimo de 20 min em solo entre um pouso e uma decolagem subsequente realizados por uma mesma aeronave. Esse tempo é estimado, sobretudo, a partir dos modelos das aeronaves empregados nas operações.
- O período de recuperação das operações se estende até o horário limite de fechamento dos aeroportos, às 23:30h.
- Deve ser respeitado o limite do horário de fechamento dos aeroportos onde não mais ocorrem pousos e/ou decolagens.
- Não está sendo limitado o número máximo de pousos e decolagens realizados durante o sequenciamento das aeronaves.
- Considera-se que qualquer base de manutenção presente nos aeroportos sejam capazes de realizar qualquer tipo de manutenção nas aeronaves da frota.
- Não está sendo considerada a possibilidade de realização de voos com as aeronaves sem passageiros, mais comumente conhecido como voos de traslados.

- Os custos referentes aos atrasos e cancelamentos de voos são estimativas.
- Considera-se que as aeronaves empregadas podem substituir umas às outras.
- Não são considerados os problemas de alocação de tripulantes e passageiros.
- Está sendo considerado o cumprimento da IAC-1224 (1999) no que se refere aos cancelamentos eventuais dos voos e/ou trocas eventuais das aeronaves previstas no HOTRAN, devido indisponibilidade operacional e/ou para atender interesses das companhias, desde que nenhum passageiro seja prejudicado.

4 ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Para efetuar uma pesquisa de caráter científico, é importante a classificação do tipo de pesquisa que está sendo realizada, de modo a possibilitar a utilização de técnicas adequadas na busca de respostas ao problema.

Para Kauark et al (2010), uma pesquisa científica pode ser classificada sob diferentes aspectos, a saber: quanto à aplicabilidade, à abordagem do problema, aos objetivos e aos procedimentos.

Quanto à aplicabilidade, esta pesquisa classifica-se como *aplicada*, pois objetiva gerar conhecimentos para a aplicação prática, dirigida à solução de problemas específicos. Ela envolve então verdades e interesses locais.

Quanto à forma de abordagem, esta pesquisa classifica-se como *quantitativa*, por traduzir o problema investigado num modelo matemático com variáveis quantificáveis, utilizando-se de técnicas de pesquisa operacional e de programação computacional.

Quanto ao objetivo, este estudo classifica-se como *explicativa*, pois visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Ele aprofunda, portanto, o conhecimento da realidade porque explica a razão, o porquê das coisas (Gil, 2007).

Por fim, quanto ao procedimento, pode ser classificado como *estudo de caso*, pois a modelagem matemática foi testada para uma situação particular, mas pode ser generalizada para outros objetos de estudo.

4.2 UNIDADE DE ANÁLISE

A estrutura do HOTRAN da companhia aérea brasileira PASSAREDO foi selecionada para a construção da rede tempo-espaço e para a aplicação do modelo matemático apresentado para análise e discussão do ARP. Até consultas realizadas em 29/01/2015, essa empresa possuía sede na cidade de Ribeirão Preto-SP, é composta por 9 aeronaves, modelos ATR-72 com capacidade para transportar até 70 passageiros, e opera 72 voos de segunda à sexta em 19 aeroportos nacionais diferentes.

4.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A rede tempo-espaço foi construída a partir do HOTRAN, disponibilizado publicamente no *site* da ANAC em 29/01/2015, do qual foi extraído o sequenciamento normal das aeronaves como forma de cumprimento de todos os voos planejados.

A análise dos custos referentes aos cancelamentos dos voos e aos atrasos foi apoiada em estimativas coletadas da literatura, conforme apresentadas na quarta etapa metodológica da Seção 4.4.

Por fim, o ARP foi analisado e discutido a partir da criação de instâncias como forma de simular a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós da rede tempo-espaço durante parte do dia ou na sua totalidade.

4.4 METODOLOGIA PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

A metodologia para a resolução do ARP baseia-se em oito etapas, conforme esquematizadas na Figura 4.1.

A *primeira etapa* consistiu na utilização do HOTRAN de 29/01/2015 da PASSAREDO para análise do ARP considerando os seus voos típicos realizados entre as segundas-feiras e as sextas-feiras. Como a construção do HOTRAN está diretamente relacionada com a análise de demanda por passageiros, alguns voos que ocorrem durante a semana não ocorrem durante o final de semana, ou vice-versa, ou ainda nem todos os voos são realizados todos os dias da semana.

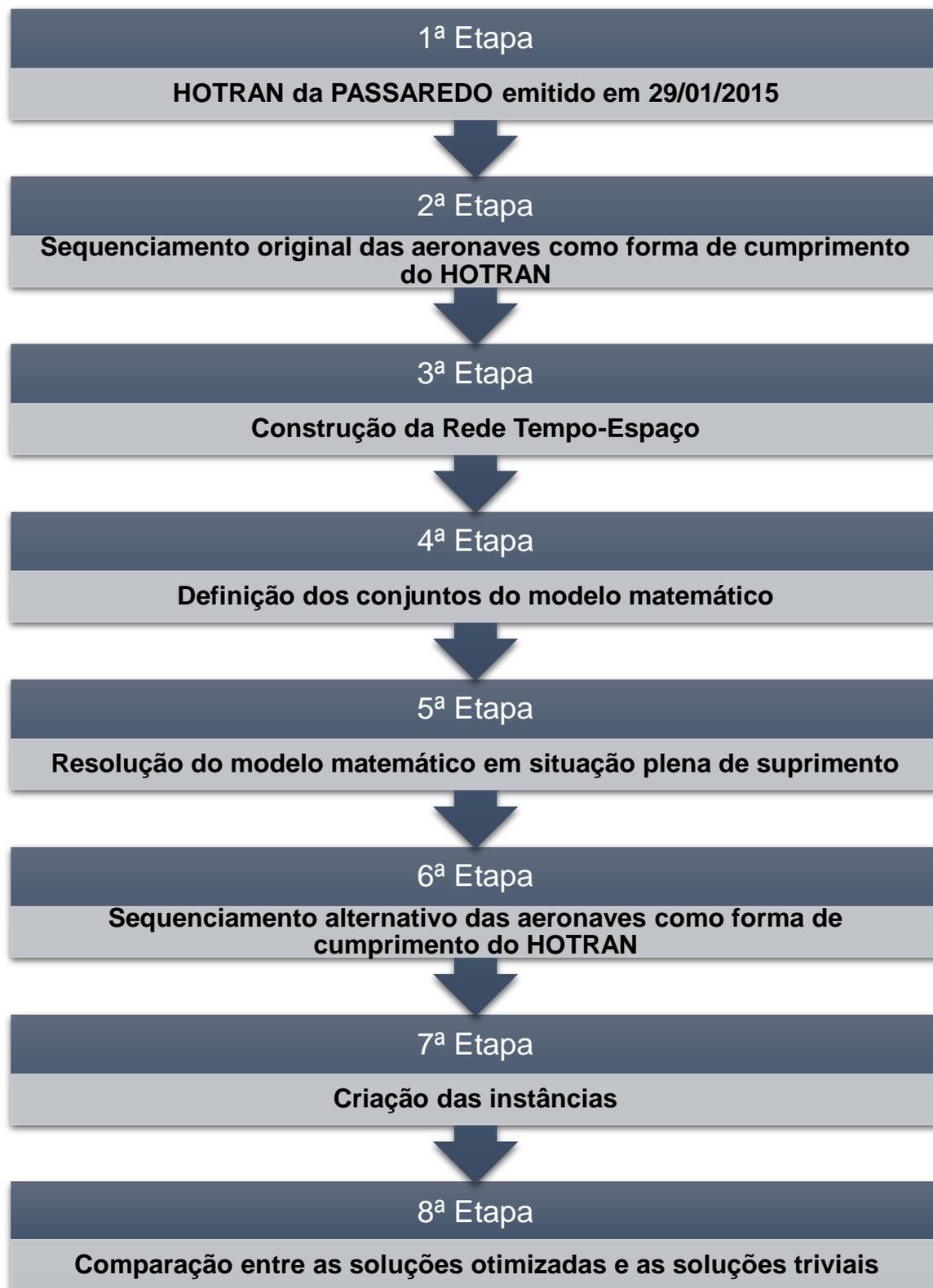


Figura 4.1: Etapas para a resolução do problema
Fonte: Próprio autor, 2015

A *segunda etapa* consistiu na determinação dos sequenciamentos das 9 aeronaves operadas pela companhia aérea, representados na Tabela 4.1, como forma de cumprimento dos 72 voos previamente estabelecidos pelo HOTRAN. Durante o dia de operação, cada aeronave é responsável pela execução de um conjunto de voos.

Não existe uma única maneira de sequenciar as aeronaves como forma de garantir a realização de todos os voos planejados. As aeronaves podem sofrer alterações no seu sequenciamento, por exemplo, como forma de cumprimento do planejamento da manutenção nas diferentes bases de manutenção localizadas nos aeroportos, ou em decorrência de mudanças das rotas após período de interrupções das operações.

Os requisitos básicos para o sequenciamento são que todos os voos sejam cumpridos com a quantidade de aeronaves disponíveis, existam aeronaves disponíveis para iniciar as operações nos aeroportos de origem, existam aeronaves disponíveis no término do dia como forma de garantir a continuidade das operações no dia seguinte, uma nova decolagem é realizada após um pouso e as aeronaves modelo ATR-72 devem respeitar o tempo mínimo em solo de 20 min entre um pouso e uma decolagem seguinte. Pode ocorrer de uma aeronave finalizar as suas operações num aeroporto diferente daquele que deu origem ao seu sequenciamento.

Tabela 4.1: Sequenciamento original das aeronaves

Aeronave	Nº do Voo	Aeroporto de Origem	Aeroporto de Destino	Partida	Chegada
1	2228	SBSV	SBQV	0:05	1:15
	2229	SBQV	SBSV	6:00	6:58
	22231	SBSV	SBQV	7:30	8:35
	22232	SBQV	SBGR	8:55	12:00
	2344	SBGR	SBCA	12:20	14:30
	2345	SBCA	SBGR	15:00	17:15
	22241	SBGR	SBQV	18:55	21:45
	22242	SBQV	SBSV	22:05	23:06
	22314	SBBR	SBRP	0:10	1:50
	22301	SBRP	SBBR	6:40	8:24
22302	SBBR	SNBR	9:07	10:35	
22303	SNBR	SBSV	10:55	12:35	

Continua na próxima página

Tabela 4.1: (Continuação)

Aeronave	Nº do Voo	Aeroporto de Origem	Aeroporto de Destino	Partida	Chegada	
2	22304	SBSV	SBQV	13:52	15:06	
	22311	SBQV	SBSV	15:26	16:36	
	22312	SBSV	SNBR	17:46	19:46	
	22313	SNBR	SBBR	20:11	21:41	
3	2204	SBRP	SBSR	0:22	0:55	
	2205	SBSR	SBRP	5:00	5:40	
	2254	SBRP	SBGL	6:15	7:47	
	2253	SBGL	SBRP	8:22	10:05	
	23781	SBRP	SBBR	10:32	12:10	
	23782	SBBR	SWSI	12:43	15:13	
	22561	SWSI	SBCY	15:35	16:21	
	22562	SBCY	SBGO	16:57	19:15	
	22563	SBGO	SBUL	19:47	20:45	
	22564	SBUL	SBRP	21:05	21:45	
	4	2271	SBRP	SBBH	6:03	7:15
		2270	SBBH	SBRP	7:40	9:01
2273		SBRP	SBBH	14:03	15:10	
2272		SBBH	SBRP	15:40	16:50	
2279		SBRP	SBBH	20:25	21:32	
2278		SBBH	SBRP	21:57	23:08	
5	22602	SBRP	SBTG	0:02	1:00	
	22611	SBTG	SBRP	4:30	5:35	
	22612	SBRP	SBGR	6:00	7:15	
	23161	SBGR	SBRP	8:00	9:04	
	23162	SBRP	SBGO	9:38	10:58	
	23163	SBGO	SBPJ	11:20	13:08	
	23164	SBPJ	SWG N	13:37	14:36	
	23171	SWG N	SBPJ	14:59	15:58	
	23172	SBPJ	SBGO	16:20	18:20	
	23173	SBGO	SBRP	18:51	20:05	
	23174	SBRP	SBGR	20:30	21:40	
22601	SBGR	SBRP	22:00	23:00		
23461	SBGR	SBCA	0:05	1:59		

Continua na próxima página

Tabela 4.1: (Continuação)

Aeronave N° do Voo	Aeroporto de Origem	Aeroporto de Destino	Partida	Chegada
	23462	SBCA	SBDO	2:20 3:20
	23471	SBDO	SBCA	4:00 5:00
	23472	SBCA	SBGR	5:20 7:30
6	23603	SBGR	SBTG	10:55 12:55
	23604	SBTG	SBDO	13:15 14:15
	23611	SBDO	SBTG	18:15 19:15
	23612	SBTG	SBGR	19:45 21:35
	2340	SBRP	SBUR	0:29 1:10
7	2341	SBUR	SBRP	5:00 5:43
	2267	SBRP	SBGR	9:26 10:25
	2266	SBGR	SBRP	17:50 18:50
	23771	SBUL	SBUR	6:20 6:50
	23772	SBUR	SBGR	7:20 8:45
	2264	SBGR	SBRP	12:30 13:32
8	2258	SBRP	SBGL	14:00 15:31
	2259	SBGL	SBRP	16:04 17:40
	2269	SBRP	SBGR	18:10 19:10
	23721	SBGR	SBUR	19:45 21:10
	23722	SBUR	SBUL	21:30 21:58
	22551	SBRP	SBUL	7:15 8:00
	22552	SBUL	SBGO	8:20 9:05
	22553	SBGO	SBCY	9:43 11:27
9	22554	SBCY	SWSI	11:57 13:10
	23791	SWSI	SBBR	14:00 16:36
	23792	SBBR	SBRP	17:15 18:55
	2252	SBRP	SBGL	19:17 20:56
	2257	SBGL	SBRP	21:28 23:05

Fonte: ANAC (2015)

A *terceira etapa* consistiu na construção da rede tempo-espço. Essa rede é composta pelo eixo horizontal, que contém os diferentes aeroportos operados pela companhia aérea, eixo vertical, dividido em intervalos de tempo a partir da definição do tamanho de banda, os nós, que são as interseções entre tempo e espaço e representam os locais e

momentos com possibilidades de ocorrência de pousos e/ou decolagens e, por fim, os arcos que são as conexões entre diferentes nós e representam as alternativas de realização dos voos com atrasos ou dentro dos horários previstos. Devido ao elevado número de nós e arcos de voos envolvidos, essa rede foi construída com o auxílio do *Visual Basic for Applications* (VBA) a partir dos sequenciamentos das aeronaves apresentados na Tabela 4.1 e seguiu os passos básicos apresentados a seguir:

1. *Determinação do eixo horizontal*: plotagem dos códigos dos diferentes aeroportos operados pela companhia aérea. No caso específico da PASSAREDO, ela opera em 19 diferentes aeroportos brasileiros.
2. *Determinação do eixo vertical*: plotagem dos intervalos de tempo a partir da definição dos tamanhos de banda. Foram empregadas as bandas de 30 min, 20 min e 15 min. Assim, para a banda de 30 min, os valores mínimo e máximo do eixo vertical são, respectivamente, 00:00h e 23:30h, variando de 30 em 30 minutos. Para a banda de 20 min, os valores mínimo e máximo do eixo vertical são, respectivamente, 00:00h e 23:40h, variando de 20 em 20 minutos. E por fim, para a banda de 15 min, os valores mínimo e máximo do eixo vertical são, respectivamente, 00:00h e 23:45h, variando de 15 em 15 minutos.
3. *Marcação dos nós a partir dos sequenciamentos das aeronaves*: os primeiros nós plotados na rede são aqueles referentes aos sequenciamentos das 9 aeronaves da frota. Para cada aeronave, o primeiro nó corresponde à marcação do local e horário da primeira decolagem. Os nós seguintes de cada aeronave, incluindo aqueles que correspondem aos últimos pousos, correspondem as marcações dos locais e horários dos pousos acrescidos do tempo de 20 min necessário em solo. Como exemplo, a aeronave 7, em situações normais e conforme apresentado na Tabela 4.1, executa os voos 2340, 2341, 2267 e 2266. A plotagem desse sequenciamento na rede tempo-espaco significa a marcação dos nós nas seguintes interseções: 0:29h em SBRP, 1:30h em SBUR, 6:03h em SBRP, 10:45h em SBGR e 19:10h em SBRP. Como se está trabalhando com o eixo do tempo dividido em intervalos de tempos predefinidos, cada um desses tempos são marcados na sua banda correspondente que, por definição, correspondem

àquela de valor igual ou imediatamente inferior aos horários dos eventos de pousos e/ou decolagens. Assim, ainda considerando o exemplo do sequenciamento da aeronave 7, para uma rede tempo-espço com banda de 15 min, a marcação dos nós ocorrem nas seguintes interseções, e conforme representada na Figura 4.2: 0:15h em SBRP, 1:30h em SBUR, 6:00h em SBRP, 10:45h em SBGR e 19:00h em SBRP.

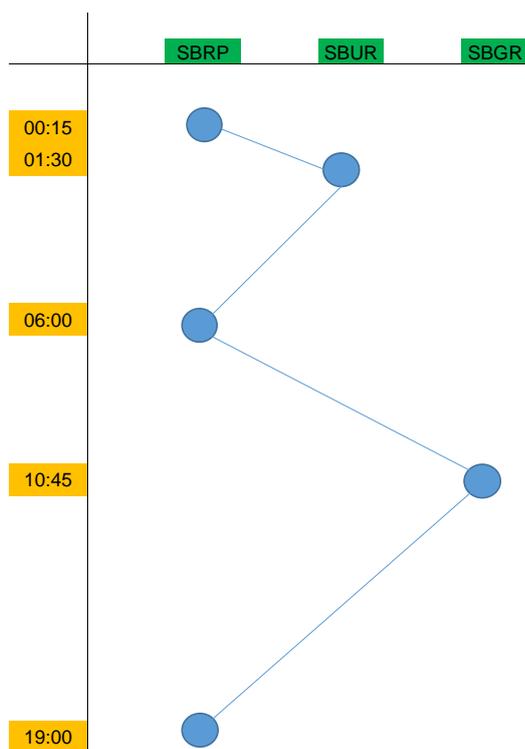


Figura 4.2: Marcação dos nós iniciais da aeronave 7
Fonte: Próprio autor, 2015

4. *Marcação dos nós adicionais:* a criação dos nós adicionais é feita a partir dos nós existentes. Assim, de maneira crescente no eixo do tempo, para cada nó existente é avaliado quais são os voos que partem a partir do aeroporto correspondente a esse nó. Com relação ao exemplo do sequenciamento da aeronave 7, para o nó criado na interseção 10:45h em SBGR, os voos que partem de SBGR, independentemente do horário, são: 2344, 22241, 23161, 22601, 23461, 23603, 2266, 2264 e 23721. Em seguida, considerando que $t = 10:45h$ seja o horário do nó marcado na rede em SBGR, d o tempo de duração dos voos que partem de SBGR, $ts = 20min$ o tempo necessário da aeronave em solo entre dois voos consecutivos realizados por ela e t' o horário de chegada dos voos nos aeroportos ZZZ , são analisadas as seguintes

condições:

- Se $(t + d + ts) \leq t'$, então marca-se um novo nó na interseção entre $(t' + ts)$ e ZZZ .

ou

- Se $(t + d + ts) > t'$, então marca-se um novo nó na interseção entre $(t + d + ts)$ e ZZZ .

Para o caso da segunda condição, considera-se ainda que o valor de d seja o menor tempo de voo entre dois aeroportos distintos já considerados na programação. Os 9 horários em negrito da Tabela 4.2 são marcados nos seus respectivos aeroportos de chegada a partir do nó marcado na interseção 10:45h em SBGR, conforme representação da Figura 4.3. Dentro da avaliação crescente dos nós a partir do eixo dos tempos, um novo nó que é criado em seguida também é alvo de avaliação se criará, ou não, novos nós. Por fim, é possível que novos nós criados coincidam com nós existentes. Nesse caso, prevalece o horário de menor valor e segue-se o critério da marcação do horário na banda de tempo igual ao imediatamente inferior.

Tabela 4.2: Todos os voos que saem de SBGR segundo o HOTRAN da PASSAREDO

Nº voo	Origem	Destino	t'	$t' + t_s$	$(t + t_s + d)$	t_s	t	d
2344	SBGR	SBCA	14:30	14:50	12:59	0:20	10:45	1:54
22241	SBGR	SBQV	21:45	22:05	13:55	0:20	10:45	2:50
23161	SBGR	SBRP	9:04	9:24	12:05	0:20	10:45	1:00
22601	SBGR	SBRP	23:00	23:20	12:05	0:20	10:45	1:00
23461	SBGR	SBCA	1:59	2:19	12:59	0:20	10:45	1:54
23603	SBGR	SBTG	12:55	13:15	13:05	0:20	10:45	2:00
2266	SBGR	SBRP	18:50	19:10	12:05	0:20	10:45	1:00
2264	SBGR	SBRP	13:32	13:52	12:05	0:20	10:45	1:00
23721	SBGR	SBUR	21:10	21:30	12:30	0:20	10:45	1:25

Fonte: Próprio autor, 2015

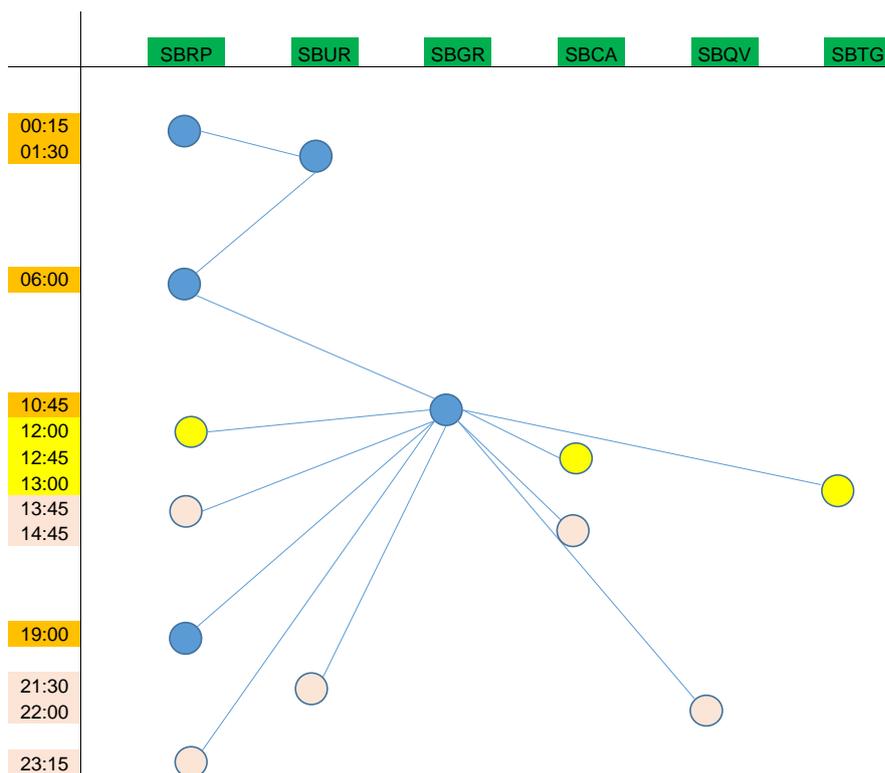


Figura 4.3: Exemplo marcação dos nós adicionais
Fonte: Próprio autor, 2015

5. *Marcação dos arcos*: a marcação dos arcos ocorre entre os nós de origens e os nós criados segundo uma das duas condições apresentadas anteriormente. Por dificuldades de visualização gráfica, as redes tempo-espaco construídas nesta dissertação estão suprimindo os arcos terminais, apesar de eles estarem sendo considerados na resolução do modelo matemático.

A rede tempo-espaco construída nesta etapa trata de uma avaliação estática a partir de uma programação de voos predefinidos e que pode sofrer perturbações a partir de indisponibilidades de aeronaves. É possível que essa rede possa ser construída a partir de outras programações de voos ou até mesmo dessa mesma programação com alguns voos atrasados e/ou adiantados. É importante notar que a rede tempo-espaco representa um momento da programação dos voos da companhia aérea e a resolução do ARP ocorre a partir desse instante. A atualização da rede pode ocorrer quantas vezes se queira durante o dia de operação, mas isso não está sendo considerado nesta dissertação.

A *quarta etapa* consistiu na extração dos conjuntos apresentados na formulação matemática a partir da construção da rede tempo-espaco para os diferentes tamanhos de

banda. Foram definidos o conjunto dos voos F , e seus subconjuntos G_i e L_i , que podem ser executados a partir do conjunto dos nós de origem P_k com destino ao conjunto dos nós H_k^i e serem realizados com custo nulo por atraso ou com algum custo por atraso a depender da diferença de tempo entre o horário de chegada possível e o horário de chegada planejado. Adicionalmente a isso, foram determinados os conjuntos dos nós intermediários e terminais, bem como o número de arcos possíveis para a execução de todos os voos planejados, ou sem atraso ou com atraso.

Sendo c_k a estimativa do custo por atrasado por unidade de tempo (R\$/min), T' o horário de chegada atrasado de um determinado voo e T o horário de chegada planejado do voo, o custo por atraso desse voo pode ser considerado como o produto $(T' - T) \cdot c_k$. O valor de c_k representa uma estimativa aproximada apresentada por Hansen e Zou (2013) para o modelo ATR-42 e o seu valor atualizado é de R\$ 60/min.

Quanto ao cálculo do custo por cancelamento, o valor de d_{ij}^k foi definido de maneira uniforme para todos os voos cancelados em R\$15.000 a partir de estimativa apresentada por Cook e Tanner (2013) para empresas que operam aeronaves com até 50 assentos.

A *quinta etapa* consistiu na resolução do modelo matemático em situação normal de operação com a determinação dos nós que os voos podem ser realizados sem custos por atrasos e/ou cancelamentos. Após a identificação de todos os nós iniciais, intermediários e terminais da rede tempo-espaco para os 3 tamanhos de bandas, e a determinação dos valores de a_i e h_i nos diferentes nós como forma de cumprimento dos voos estabelecidos na Tabela 4.1, foram encontrados os valores de x_{ij}^k , y_k e z_i .

Isso significa que, ao serem empregadas as 9 aeronaves disponíveis e conhecidos os nós iniciais que suprem a_i aeronaves, os nós intermediários com um balanço nulo de aeronaves e os nós terminais que demandam h_i aeronaves, a resolução do modelo matemático nessas condições confirma a ocorrência de todos os voos programados no horário entre os nós i e j , ausência de cancelamento de voos e a determinação dos nós terminais que as diferentes aeronaves estarão posicionadas até o final do dia de operação.

A *sexta etapa* está diretamente relacionada com a quinta etapa porque, após a determinação das variáveis x_{ij}^k , foi possível encontrar um novo sequenciamento das aeronaves

conhecendo-se por quais nós das redes cada aeronave deverá passar. Como os valores de i e j estão relacionados com o valor de k , foi possível a organização dos novos sequenciamentos das aeronaves, os quais inclusive podem coincidir com os sequenciamentos originais, e que conservam todos os requisitos necessários de operação e um valor nulo da função objetivo. Esse procedimento foi necessário porque deu autonomia ao resolvidor para encontrar os valores de x_{ij}^k e assim determinar por quais nós cada uma das 9 aeronaves devem passar para que todos os voos sejam cumpridos no horário e com uma função objetivo nula.

A criação das instâncias representa a *sétima etapa* e viabiliza o cumprimento da oitava etapa. Após o conhecimento dos nós iniciais, intermediários e terminais das redes tempo-espço construídas com os três tamanhos de bandas, cada instância consiste nas variações dos valores de a_i e h_i nesses nós. Essas alterações simulam interrupções das operações uma vez que possibilitam as modificações das quantidades de aeronaves supridas e demandadas e também as suas localizações nos diferentes nós das redes.

Para cada tamanho de banda empregado para a construção da rede tempo-espço, que gera um conjunto diferente de nós, foi convencionada a criação de 100 instâncias diferentes que representam a indisponibilidade de até 3 aeronaves durante todo o dia de operação e a indisponibilidade de até 3 aeronaves durante parte do dia de operação.

As instâncias de indisponibilidade de até 3 aeronaves durante todo o dia de operação são de três tipos: INDISP-X, INDISP-X-Y e INDISP-X-Y-Z. O valor de X representa o nó de suprimento que uma aeronave estará indisponível para operações, Y representa o nó de suprimento que uma segunda aeronave estará indisponível e Z representa o nó de suprimento que uma terceira aeronave estará indisponível. A Figura 4.4 representa esquematicamente um exemplo hipotético das instâncias INDISP-1, INDISP-1-8 e INDISP-1-8-4. A indisponibilidade de uma aeronave durante o dia de operação significa que os valores nos nós de suprimento (a_i) e de demanda (h_i) são nulos.

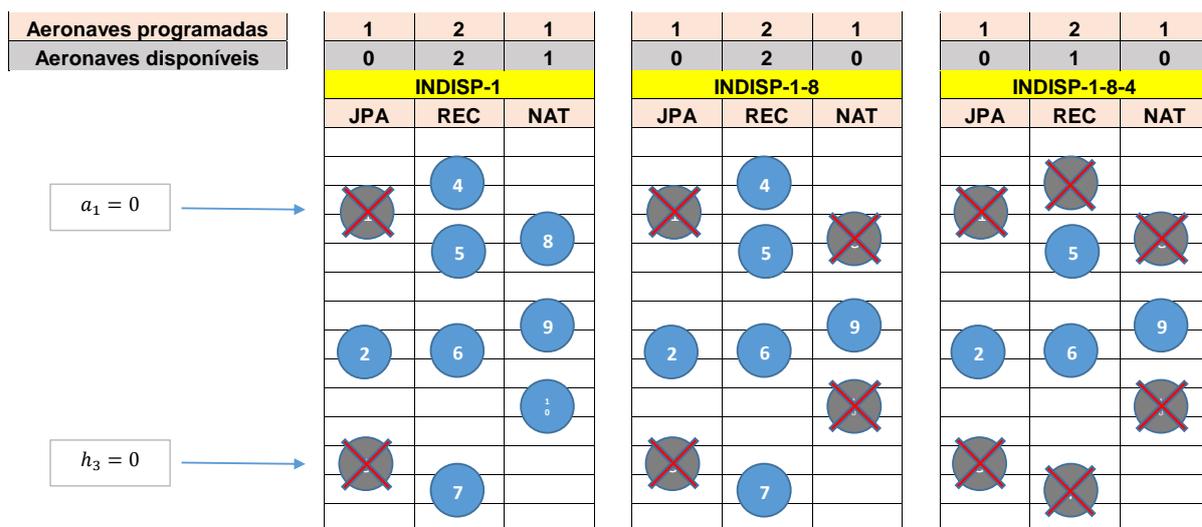


Figura 4.4: Ilustração das instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z

Fonte: Próprio autor, 2015

As instâncias de indisponibilidade de até 3 aeronaves durante parte do dia de operação são de três tipos: DISP-X, DISP-X-Y e DISP-X-Y-Z. O valor de X representa o nó de suprimento a partir do qual uma aeronave estará disponível para operações, Y representa o nó de suprimento a partir do qual uma segunda aeronave estará disponível e Z representa o nó de suprimento a partir do qual uma terceira aeronave estará disponível. A Figura 4.5 representa esquematicamente um exemplo hipotético das instâncias DISP-2, DISP-2-9 e DISP-2-9-6. Nesse caso, a indisponibilidade parcial de uma aeronave significa que os valores nos nós de suprimento (a_i) são nulos até o momento em que a aeronave volte a estar disponível para operação.

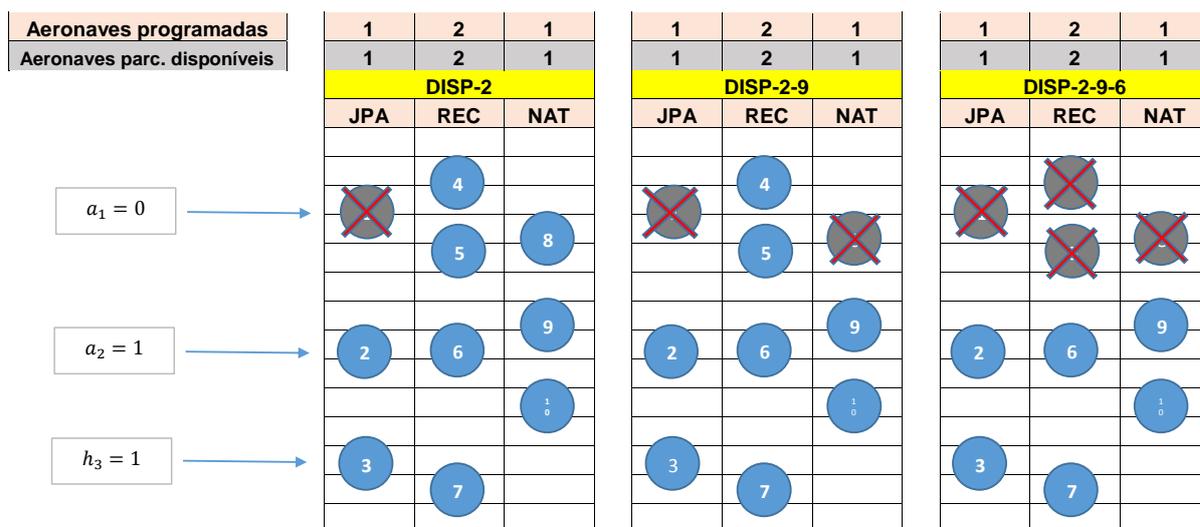


Figura 4.5: Ilustração das instâncias do tipo DISP-X-Y-Z
 Fonte: Próprio autor, 2015

A *oitava etapa* consistiu na comparação entre os valores das soluções triviais para as diferentes instâncias, a partir do sequenciamento de cada aeronave, e os valores ótimos da função objetivo para essas mesmas instâncias. Esse critério de análise é importante para se ter a ideia de quão melhores são as soluções otimizadas em relação às soluções convencionais ou, como estão sendo tratadas nesta dissertação, em relação às soluções triviais, e já foi adotado nos estudos de Bard et al (2001) e Arguello et al (1998).

Conforme apresentado na sexta etapa, é possível definir o sequenciamento alternativo das aeronaves contendo informações sobre quais voos cada aeronave ficará responsável, quais são os nós de suprimento, os nós de demanda e os nós intermediários, como forma de cumprimento da programação de voos apresentada na Tabela 4.1.

Para o caso das instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z, a solução trivial é aquela considerando a soma dos custos por cancelamento dos voos que seriam realizados pelas aeronaves que estejam indisponíveis a partir do nó inicial de suprimento. A Figura 4.6 representa o que seria a solução trivial para as instâncias INDISP-1, INDISP-1-8 e INDISP-1-8-4. No caso, seriam cancelados todos os voos atribuídos às aeronaves 1, 2 e 4, respectivamente.

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves disponíveis			0	2	1
PROGRAMAÇÃO			INDISP-1		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves disponíveis			0	2	0
PROGRAMAÇÃO			INDISP-1-8		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves disponíveis			0	1	0
PROGRAMAÇÃO			INDISP-1-8-4		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Figura 4.6: Ilustração da solução trivial para instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z
 Fonte: Próprio autor, 2015

Já para o caso das instâncias do tipo DISP-X-Y-Z, a solução trivial é aquela considerando a soma dos custos por cancelamento dos voos que seriam realizados pelas aeronaves até os nós que a aeronaves passem a estar disponíveis. A Figura 4.7 representa o que seria a solução trivial para as instâncias DISP-2, DISP-2-9 e DISP-2-9-6. No caso, seriam parcialmente cancelados os voos atribuídos às aeronaves 1, 2 e 4, respectivamente.

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves parc. disponíveis			1	2	1
PROGRAMAÇÃO			DISP-2		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves parc. disponíveis			1	2	1
PROGRAMAÇÃO			DISP-2-9		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Aeronaves programadas			1	2	1
Aeronaves parc. disponíveis			1	2	1
PROGRAMAÇÃO			DISP-2-9-6		
Aeronave	Origem	Destino	JPA	REC	NAT
1	JPA(1)	REC(5)			
	REC(5)	JPA(2)		4	
	JPA(2)	REC(7)	1		
2	NAT(8)	REC(5)		5	8
	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)	2	6	9
3	REC(4)	JPA(1)			
	JPA(1)	REC(6)			10
	REC(6)	NAT(10)			
	NAT(10)	JPA(3)	1		
4	REC(5)	NAT(9)			
	NAT(9)	REC(6)		7	
	REC(6)	JPA(3)			

Figura 4.7: Ilustração da solução trivial para instâncias do tipo DISP-X-Y-Z
 Fonte: Próprio autor, 2015

A resolução do ARP envolvendo as diferentes instâncias eventualmente alteram o sequenciamento das aeronaves e fornecem o valor mínimo da função objetivo, em termos de custos, e as variáveis de decisão x_{ij}^k , y_k e z_i . Assim, a solução informa quais voos k devem ocorrer entre os nós i e j , com atrasos ou sem atrasos, quais voos k devem ser cancelados e quantas aeronaves z_i deverão estar nos nós terminais como forma de dar continuidade às operações no dia seguinte.

4.5 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO MÉTODO

A resolução do ARP é fundamental para as companhias aéreas, tendo em vista que a aeronave representa o insumo mais importante para as suas operações. As principais características/contribuições do método adotado podem ser assim relacionadas:

- É possível o acoplamento do ARP com outros subproblemas considerados também relevantes.
- A metodologia proposta possibilita uma solução exata considerando a discretização do tempo em bandas fixas.
- É possível a generalização e aplicação dessa metodologia em companhias aéreas regulares de pequeno porte tomando como base o seu HOTRAN (ou equivalente no exterior) ou até mesmo utilizando informações em tempo real sobre a situação da malha aérea.
- Do ponto de vista científico, nem sempre é possível ter acesso às informações *online* sobre os voos das companhias aéreas. Assim, uma alternativa factível, e sem prejuízo da técnica, é o emprego do HOTRAN para a análise do ARP para qualquer companhia aérea brasileira de pequeno porte e aplicação das etapas apresentadas na Figura 4.1.
- Dentro das etapas metodológicas apresentadas, a construção e solução das instâncias do tipo INDISP-X-Y-Z e DISP-X-Y-Z, aliadas à comparação das soluções triviais, representam uma maneira simples de analisar a eficácia do modelo matemático e a técnica de otimização empregados.

- Outro aspecto importante é que a solução do ARP empregando aeronave reserva possibilita uma análise de viabilidade econômica se vale a pena ou não a aquisição e disponibilização de outras aeronaves pela companhia aérea.

4.6 LIMITAÇÕES DO MÉTODO

A resolução exata do modelo matemático, baseada no conceito de nós extraídos da rede tempo-espço, torna restritiva em relação ao tamanho do HOTRAN empregado. Quanto maior o número de voos, de aeronaves e de aeroportos a serem operados pela companhia aérea, mais improvável será a possibilidade de resolução do problema via PLI. Assim, a metodologia adotada é mais indicada para companhias aéreas regulares de pequeno porte.

Da mesma forma que a dimensão do HOTRAN pode afetar a capacidade de resolução do ARP por essa metodologia, o tamanho de banda empregado para a construção da rede tempo-espço também pode inviabilizá-la, tendo em vista que quanto menor o tamanho da banda, maior será a quantidade de nós gerados.

A precisão da solução está relacionada com o tamanho das bandas empregadas. Assim, quanto menor a banda, melhor será a qualidade da solução. Por sua vez, para banda muito pequena, poderá ser inviável a resolução via PLI.

5 RESULTADOS

Para cada seção a seguir, são apresentadas e discutidas as diferentes configurações da rede tempo-espaço com tamanhos de bandas de 30 min, 20 min, 15 min e 15 min com aeronave reserva, o sequenciamento normal das aeronaves que implica em custos nulos por atrasos e/ou cancelamento dos voos e o comparativo entre as soluções ótimas encontradas e as soluções triviais para diferentes instâncias testadas. Além disso, é apresentado o comparativo dos resultados encontrados para as redes com os diferentes tamanhos de bandas empregados.

Apesar de a apresentação dos resultados estar centrada nos valores da função objetivo encontrados para as diferentes instâncias, a solução final fornece os valores de x_{ij}^k (quais voos deverão ocorrer), y_k (quais voos deverão ser cancelados) e z_i (em que quantidade e onde as aeronaves deverão finalizar as suas operações até o final do dia).

Para a resolução do modelo matemático foram empregados o UFFLP versão 3.3.0, o qual consiste numa biblioteca de funções, que integrou o resolvidor CPLEX versão 12.5.1 com a linguagem de programação VBA. Foi utilizado um computador com a plataforma *Windows 7* e equipado com o processador i5 2,27 GHz.

5.1 REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 30 min

Cada rede tempo-espaço construída com os tamanhos de bandas de 30 min, 20 min ou 15 min possuem as características comuns de serem geradas a partir da programação dos 72 voos apresentados na Tabela 4.1, operarem em 19 aeroportos diferentes do Brasil a partir de uma frota composta por 9 aeronaves e não estarem sendo representados graficamente

os arcos terminais.

A rede tempo-espaço construída com banda de 30 min e representada pela Figura 5.1 é composta por 48 bandas de tempo variando entre 00:00h e 23:30h, por 532 nós, numerados de cima para baixo e da esquerda para a direita, compondo os nós iniciais, intermediários e terminais, e por 1998 arcos de voos, que significam as alternativas de realização dos voos programados com atrasos ou não.

Ainda na Figura 5.1 estão sendo representados graficamente os sequenciamentos das 9 aeronaves disponíveis conforme os nós apresentados na Tabela 5.2 e como forma de cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1.

Esse novo sequenciamento foi determinado a partir da resolução do modelo matemático empregando todas as 9 aeronaves localizadas nos nós de suprimentos conforme apresentados na Tabela 4.1. Assim, para o caso da rede construída com uma banda de 30 min, os pares de nós de suprimento e de demanda por 1 aeronave foram, respectivamente, 1-26 em SBSV, 49-81 em SBGR, 112-141 em SBBR, 142-179 em SBRP, 142-179 em SBRP, 142-179 em SBRP, 145-179 em SBRP, 146-179 em SBRP e 339-371 em SBUL. O valor da função objetivo, como esperado, foi nulo.

Os valores encontrados para x_{ij}^k após a resolução do modelo nas condições descritas anteriormente definem os novos sequenciamentos das 9 aeronaves. A Tabela 5.2 apresenta os nós de suprimento de 1 aeronave e de demanda por 1 aeronave nos pares de nós, respectivamente, 1-178, 49-78, 112-138, 142-178, 142-368, 142-178, 145-170, 146-176 e 339-25.

A determinação dos novos sequenciamentos das aeronaves foi necessária para serem conhecidos os valores obtidos pelo resolvidor para uma situação de suprimento pleno das aeronaves e assim poder construir as instâncias que representam os cenários de indisponibilidades de aeronaves e também ser possível o cálculo das respectivas soluções triviais.

Para a análise do ARP, foram geradas 100 instâncias a partir da Tabela 5.2, que são as representadas na Tabela 5.3. Cada instância significa uma situação de indisponibilidade de até 3 aeronaves em alguns dos nós da rede tempo-espaço. Assim, cada um dos 532 nós da rede tempo-espaço, construída com uma banda de 30 min, é atribuído um valor como

forma de atendimento das restrições de conservação do fluxo representadas pelas Equações (3.6) e (3.7).

Como exemplo, a instância INDISP-49-339-146 significa que 3 aeronaves encontram-se indisponíveis nos nós 49, 339 e 146. A indisponibilidade no nó de suprimento 49, localizado no aeroporto SBGR, representa a subtração de uma aeronave nesse nó. Por conseguinte, há subtração de uma aeronave também no nó 81, que é o seu nó correspondente de demanda. Isso também vale para o nó de suprimento 339 e o seu nó de demanda 371 e também para o nó de suprimento 146 e o seu nó de demanda 179.

Por definição, a solução trivial para essa instância representa o cancelamento de todos os voos que seriam realizados por essas aeronaves indisponíveis. Assim, de acordo com a Tabela 5.2, seriam cancelados todos os voos atribuídos às aeronaves 2, 8 e 9, totalizando 22 voos a um custo total de R\$330.000. Em contrapartida, a solução ótima para essa instância foi de R\$216.000, uma diferença de 34,5% em relação à solução trivial, e os valores de x_{ij}^k , y_k e z_i estão apresentados na Tabela 5.1.

As colunas x_{ij}^k apresentam os voos k que devem ser realizados entre os nós i e j . Alguns deles em situação de atraso. A coluna y_k apresenta quais voos k devem ser cancelados. Para esse caso, é possível notar que na solução ótima foram cancelados 14 voos, enquanto que na solução trivial foram cancelados 22 voos. Por fim, a coluna z_i apresenta a quantidade de aeronaves remanescentes que deverão estar disponíveis nos nós terminais em parêntese.

Tabela 5.1: Solução ótima para a instância INDISP-49-339-146

	x_{ij}^k	x_{ij}^k	y_k	z_i			
142	202	2204	4	32	22304	2273	1 (25)
202	145	2205	32	12	22311	2272	1 (138)
1	27	2228	12	195	22312	23603	1 (176)
27	2	2229	195	138	22313	23604	3 (178)
170	257	2252	112	143	22314	23611	
233	152	2253	145	340	22551	23612	
145	233	2254	340	309	22552	23461	
257	178	2257	309	284	22553	23462	
159	246	2258	284	263	22554	23471	
246	168	2259	267	294	22561	23472	
58	159	2264	294	330	22562	23771	
73	173	2266	330	366	22563	23772	
150	55	2267	366	176	22564	23721	
168	73	2269	78	178	22601	23722	
372	150	2270	142	399	22602		
145	372	2271	399	144	22611		
394	178	2278	144	50	22612		
172	394	2279	50	150	23161		
142	497	2340	150	313	23162		
497	145	2341	313	433	23163		
55	93	2344	433	455	23164		
93	69	2345	455	439	23171		
2	28	22231	439	328	23172		
28	58	22232	328	172	23173		
69	45	22241	173	78	23174		
45	25	22242	152	121	23781		
143	113	22301	121	267	23782		
113	180	22302	263	127	23791		
180	4	22303	127	170	23792		

Fonte: Próprio autor, 2015

A Figura 5.2 apresenta o comparativo entre as soluções ótimas e as soluções triviais. Para todas as instâncias testadas, as soluções ótimas tiveram os seus valores inferiores ou pelo menos iguais às soluções triviais.

A Figura 5.3 complementa as informações da Figura 5.2, apresentando a diferença percentual entre as soluções ótimas e as soluções triviais de todas as instâncias testadas. Para uma rede tempo-espaco com banda de 30 min, o valor médio entre essas diferenças foi de **38,24%**.

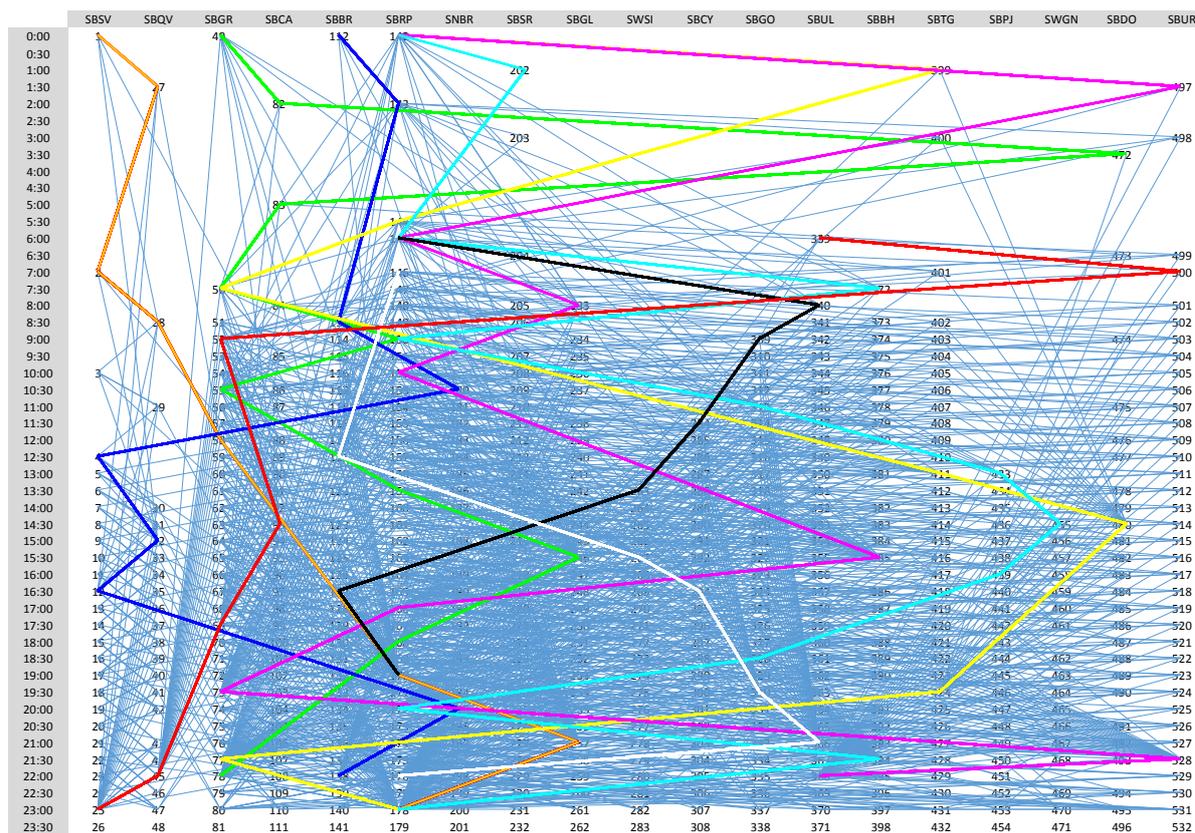


Figura 5.1: Rede tempo-espaço com banda de 30 min
Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.2: Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
1	1	27	2228
	27	2	2229
	2	28	22231
	28	58	22232
	58	170	2266
	170	257	2252
2	257	178	2257
	49	82	23461
	82	472	23462
	472	83	23471
	83	50	23472
	50	150	23161
	150	55	2267
	55	159	2264
	159	246	2258
	246	168	2259
168	78	23174	
	112	143	22314
	143	113	22301
	113	180	22302

Continua na próxima página

Tabela 5.2: (*Continuação*)

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
3	180	4	22303
	4	32	22304
	32	12	22311
	12	195	22312
	195	138	22313
4	142	399	22602
	399	144	22611
	144	50	22612
	50	411	23603
	411	480	23604
	480	424	23611
	424	77	23612
	77	178	22601
5	142	497	2340
	497	145	2341
	145	233	2254
	233	152	2253
	152	385	2273
	385	166	2272
	166	73	2269
	73	528	23721
	528	368	23722
6	142	202	2204
	202	145	2205
	145	372	2271
	372	150	2270
	150	313	23162
	313	433	23163
	433	455	23164
	455	439	23171
	439	328	23172
	328	172	23173
	172	394	2279
394	178	2278	
7	145	340	22551
	340	309	22552
	309	284	22553
	284	263	22554
	263	127	23791
	127	170	23792
8	146	121	23781
	121	267	23782
	267	294	22561
	294	330	22562
	330	366	22563
	366	176	22564

Continua na próxima página

Tabela 5.2: (*Continuação*)

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
9	339	500	23771
	500	52	23772
	52	93	2344
	93	69	2345
	69	45	22241
	45	25	22242

Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.3: Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 30 min

Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min			
INDISP-1	INDISP-49	INDISP-112	INDISP-142
INDISP-145	INDISP-146	INDISP-339	INDISP-145-142
INDISP-142-112	INDISP-112-145	INDISP-1-145	INDISP-146-145
INDISP-1-142	INDISP-146-142	INDISP-339-146	INDISP-1-339
INDISP-142-142	INDISP-112-146	INDISP-339-112	INDISP-145-339
INDISP-1-146	INDISP-112-1	INDISP-339-142	INDISP-112-49
INDISP-49-142	INDISP-1-49	INDISP-49-146	INDISP-339-49
INDISP-49-145	INDISP-49-339-146	INDISP-142-145-49	INDISP-112-1-146
INDISP-146-112-142	INDISP-142-146-142	INDISP-49-142-142	INDISP-142-142-142
INDISP-339-146-142	INDISP-146-339-112	INDISP-49-145-1	INDISP-142-145-142
INDISP-142-339-142	INDISP-142-112-142	INDISP-145-142-339	INDISP-112-145-339
INDISP-146-1-142	INDISP-112-1-49	INDISP-1-112-145	INDISP-49-142-339
INDISP-339-1-112	INDISP-146-145-49	INDISP-49-112-339	INDISP-112-145-142
INDISP-145-112-146	INDISP-339-112-142	INDISP-112-146-49	INDISP-112-49-145
INDISP-142-112-49	INDISP-145-339-49	INDISP-146-145-142	INDISP-339-1-146
INDISP-146-1-49	INDISP-1-339-145	INDISP-146-1-145	DISP-2
DISP-50	DISP-55	DISP-113	DISP-144
DISP-145	DISP-152	DISP-166	DISP-150
DISP-172	DISP-2-50	DISP-2-55	DISP-50-113
DISP-50-144	DISP-55-113	DISP-113-145	DISP-144-152
DISP-145-150	DISP-152-150	DISP-166-172	DISP-2-50-113
DISP-2-55-144	DISP-55-113-144	DISP-50-144-150	DISP-113-144-145
DISP-113-145-150	DISP-144-145-150	DISP-144-166-145	DISP-144-152-172
DISP-50-145-172	DISP-2-113-145	DISP-2-144-150	DISP-50-166-145
DISP-50-145-150	DISP-113-152-150	DISP-55-144-150	DISP-55-145-150

Fonte: Próprio autor, 2015

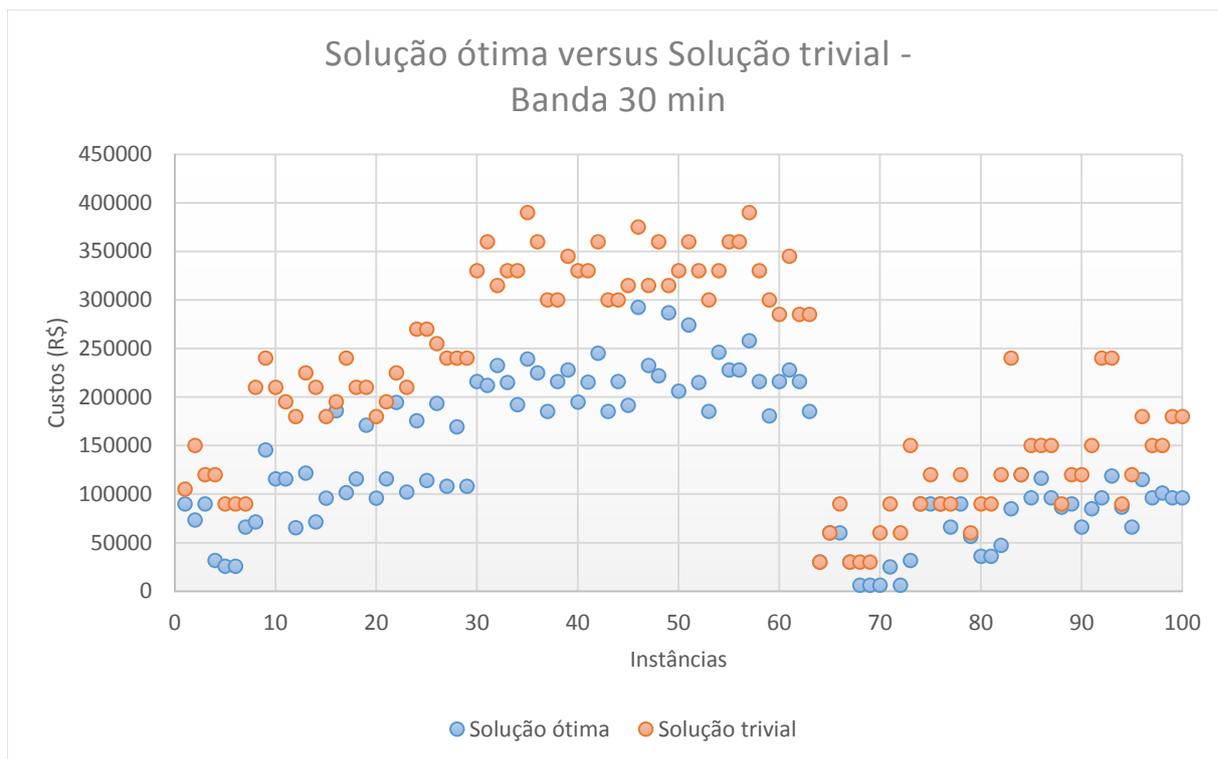


Figura 5.2: Solução ótima *versus* solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min
Fonte: Próprio autor, 2015

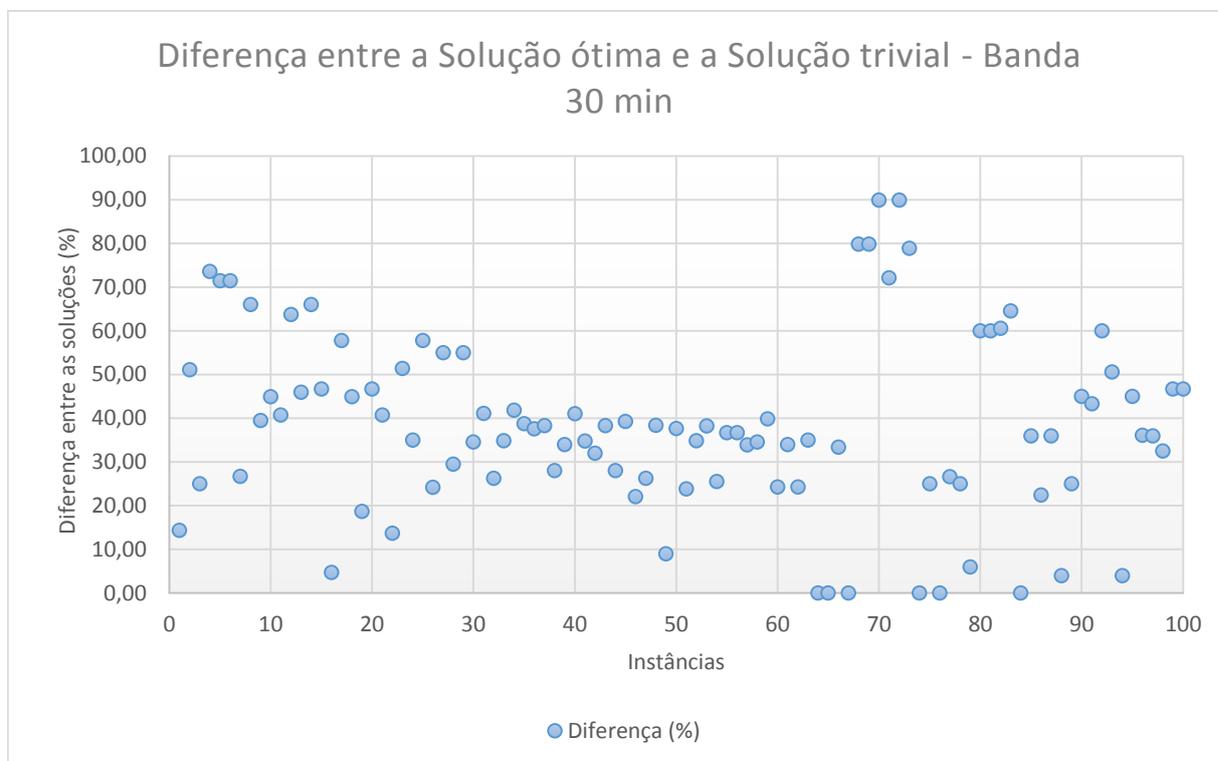


Figura 5.3: Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 30 min

Fonte: Próprio autor, 2015

5.2 REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 20 min

A rede tempo-espaço, construída com banda de 20 min e representada pela Figura 5.4, é composta por 72 bandas de tempo variando entre 00:00h e 23:40h, por 768 nós e por 2838 arcos de voos. Nessa rede também estão sendo representados graficamente os sequenciamentos das 9 aeronaves disponíveis a partir dos nós apresentados na Tabela 5.4 e como forma de cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1.

A Tabela 5.4 apresenta os nós de suprimento de 1 aeronave e de demanda por 1 aeronave nos pares de nós, respectivamente, 1-519, 64-248, 157-248, 196-244, 197-239, 197-191, 200-32, 201-107 e 478-248.

Para a análise do ARP, foram geradas 100 instâncias a partir da Tabela 5.4 e são aquelas representadas na Tabela 5.5. Cada um dos 768 nós da rede tempo-espaço, construída com uma banda de 20 min, é atribuído um valor como forma de atendimento das restrições de conservação do fluxo representadas pelas Equações (3.6) e (3.7).

A Figura 5.5 apresenta o comparativo entre as soluções ótimas e as soluções triviais. Para todas as instâncias testadas as soluções ótimas tiveram os seus valores inferiores ou pelo menos iguais às soluções triviais.

A Figura 5.6 apresenta a diferença percentual entre as soluções ótimas e as soluções triviais de todas as instâncias testadas. Para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min, o valor médio entre essas diferenças foi de **40,44%**.

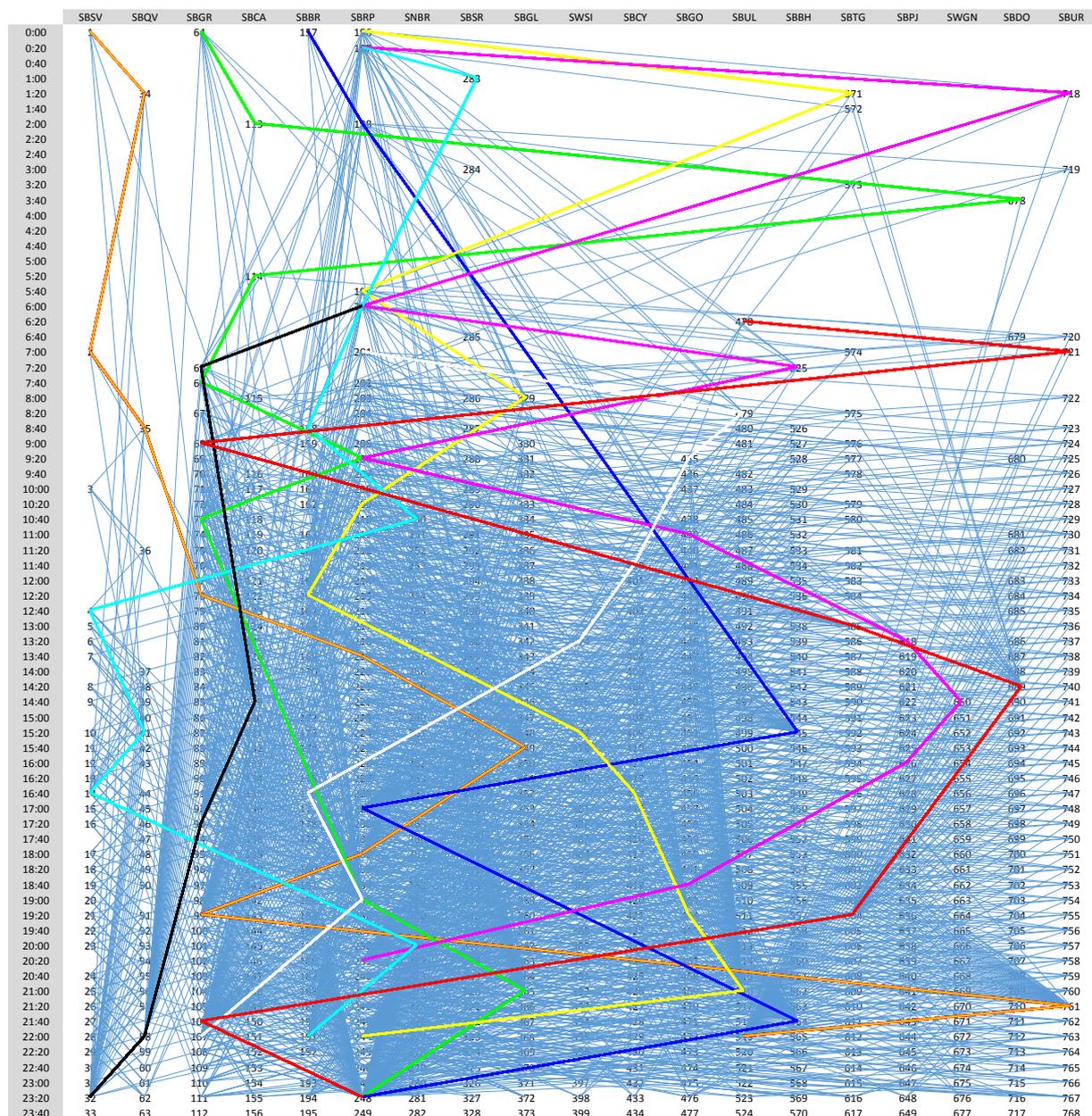


Figura 5.4: Rede tempo-espaço com banda de 20 min
Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.4: Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
1	1	34	2228
	34	2	2229
	2	35	22231
	35	78	22232
	78	219	2264
	219	349	2258
	349	232	2259
	232	99	2269
	99	761	23721

Continua na próxima página

Tabela 5.4: (*Continuação*)

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
	761	519	23722
	64	113	23461
	113	678	23462
	678	114	23471
	114	66	23472
2	66	206	23161
	206	73	2267
	73	235	2266
	235	365	2252
	365	248	2257
	157	198	22314
	198	545	2273
3	545	229	2272
	229	564	2279
	564	248	2278
	196	571	22602
	571	199	22611
	199	329	2254
	329	209	2253
	209	166	23781
4	166	377	23782
	377	413	22561
	413	464	22562
	464	516	22563
	516	244	22564
	197	718	2340
	718	200	2341
	200	525	2271
	525	206	2270
	206	439	23162
5	439	618	23163
	618	650	23164
	650	626	23171
	626	462	23172
	462	239	23173
	197	283	2204
	283	200	2205
	200	158	22301
	158	250	22302
6	250	4	22303
	4	41	22304
	41	14	22311
	14	271	22312
	271	191	22313
	200	65	22612
	65	129	2344

Continua na próxima página

Tabela 5.4: (*Continuação*)

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
7	129	93	2345
	93	58	22241
	58	32	22242
8	201	479	22551
	479	435	22552
	435	400	22553
	400	374	22554
	374	176	23791
	176	235	23792
	235	107	23174
9	478	721	23771
	721	68	23772
	68	585	23603
	585	689	23604
	689	604	23611
	604	106	23612
	106	248	22601

Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.5: Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 20 min

Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min			
INDISP-201-197	INDISP-64-196	INDISP-64-197	INDISP-157-64
INDISP-157-197	INDISP-1-157	INDISP-64-478	INDISP-196-478
INDISP-157-200	INDISP-196-157	INDISP-201-64	INDISP-1-64
INDISP-1-478	INDISP-1-201	INDISP-197-196	INDISP-197-197
INDISP-200-1	INDISP-478-201	INDISP-200-64	INDISP-478-200
INDISP-201-200	INDISP-157-201	INDISP-1-196	INDISP-200-197-478
INDISP-157-1-201	INDISP-1-201-197	INDISP-200-196-197	INDISP-201-196-197
INDISP-478-197-157	INDISP-64-196-201	INDISP-196-64-200	INDISP-197-478-64
INDISP-64-197-197	INDISP-201-200-478	INDISP-201-157-197	INDISP-197-157-200
INDISP-197-64-201	INDISP-197-196-478	INDISP-200-157-201	INDISP-197-196-157
INDISP-64-200-1	INDISP-64-157-197	INDISP-201-1-64	INDISP-64-478-196
INDISP-157-196-478	INDISP-197-196-197	INDISP-201-478-197	INDISP-157-478-200
INDISP-478-1-200	INDISP-201-157-64	INDISP-197-478-197	INDISP-200-201-196
INDISP-197-157-197	INDISP-201-1-478	INDISP-200-197-201	INDISP-197-196-64
INDISP-478-157-64	INDISP-64-200-201	INDISP-200-196-157	INDISP-197-197-201
INDISP-200-157-1	INDISP-201-200-1	INDISP-200-1-196	INDISP-201-478-64
INDISP-1-478-157	INDISP-478-157-201	INDISP-1-64-157	INDISP-64-478-200
INDISP-64-1-478	INDISP-64-157-200	INDISP-196-200-478	INDISP-157-196-64
DISP-2	DISP-66	DISP-73	DISP-199
DISP-206	DISP-209	DISP-2-66	DISP-66-199
DISP-66-209	DISP-199-200	DISP-209-200	DISP-2-66-200
DISP-66-199-206	DISP-73-199-200	DISP-199-206-200	DISP-209-206-200

Fonte: Próprio autor, 2015

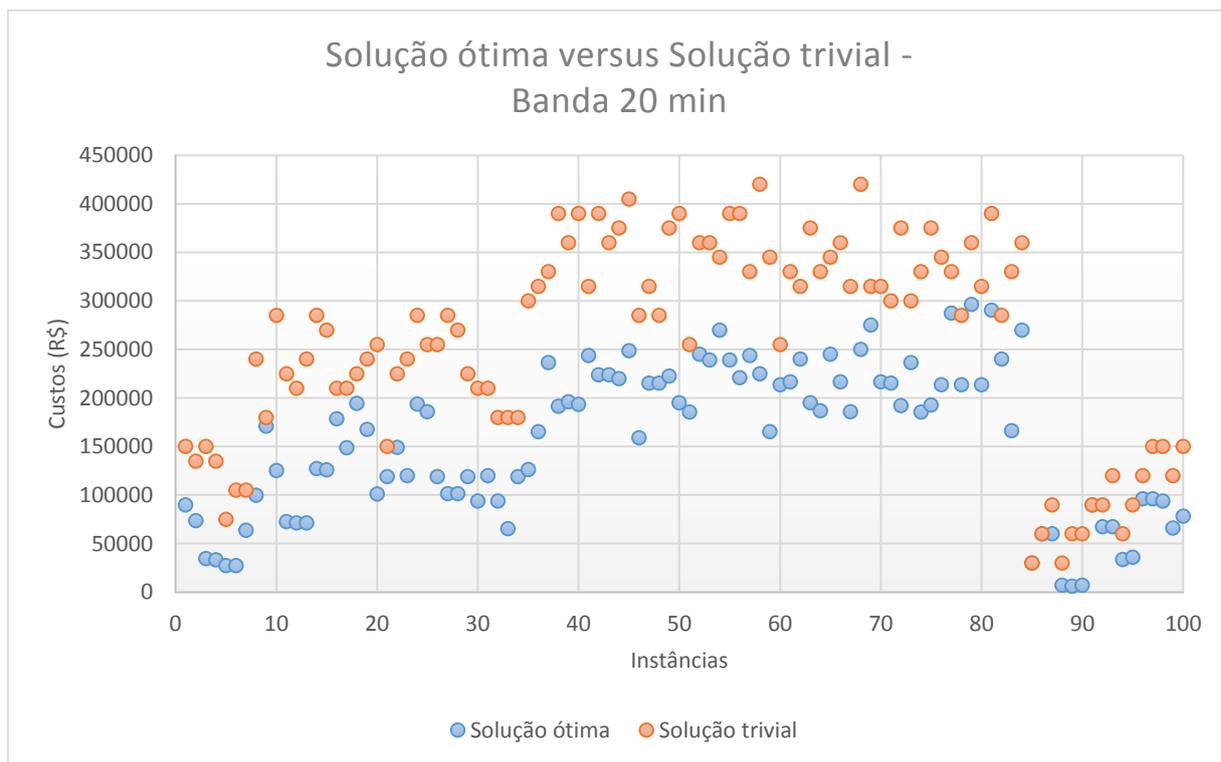


Figura 5.5: Solução ótima *versus* solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min
Fonte: Próprio autor, 2015

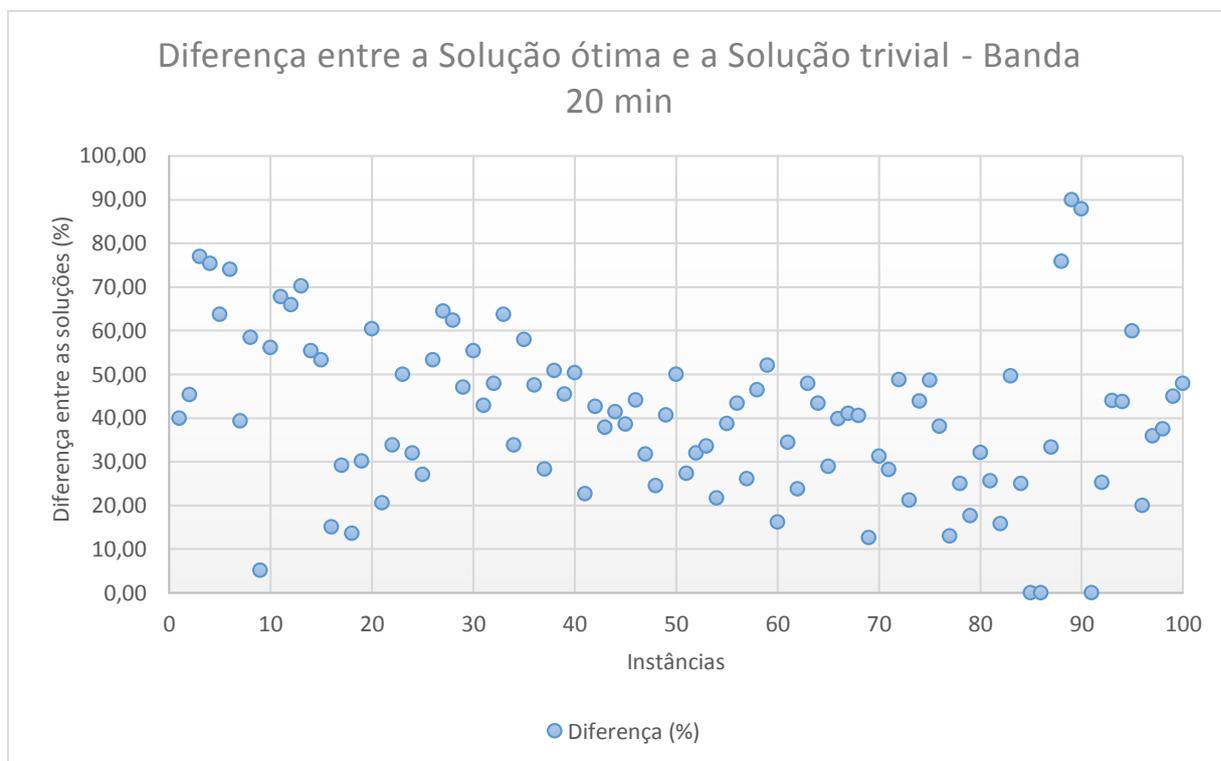


Figura 5.6: Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 20 min

Fonte: Próprio autor, 2015

5.3 REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 15 min

A rede tempo-espaço, construída com banda de 15 min e representada pela Figura 5.7, é composta por 96 bandas de tempo variando entre 00:00h e 23:45h, por 986 nós e por 3615 arcos de voos. Nessa figura também estão sendo representados os sequenciamentos das 9 aeronaves disponíveis a partir dos nós apresentados na Tabela 5.6 de forma que os voos previstos na Tabela 4.1 sejam cumpridos.

Os nós de suprimento de 1 aeronave e de demanda por 1 aeronave são apresentados na Tabela 5.6 e representam, respectivamente, os pares de nós 1-676, 84-44, 204-310, 256-322, 257-322, 257-317, 260-248, 261-139 e 624-322.

O ARP foi analisado a partir da geração de 100 instâncias tomando como base a Tabela 5.6. As instâncias para a rede tempo-espaço construída com banda de 15 min são aquelas representadas na Tabela 5.7. Cada um dos 986 nós é atribuído um valor como forma de atendimento das restrições de conservação do fluxo representadas pelas Equações (3.6) e (3.7).

O comparativo entre as soluções ótimas e as soluções triviais é apresentada na Figura 5.8. Para todas as instâncias testadas as soluções ótimas tiveram os seus valores inferiores ou pelo menos iguais às soluções triviais.

A diferença percentual entre as soluções ótimas e as soluções triviais de todas as instâncias testadas é apresentada na Figura 5.9. Para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min, o valor médio entre essas diferenças foi de **41,15%**.

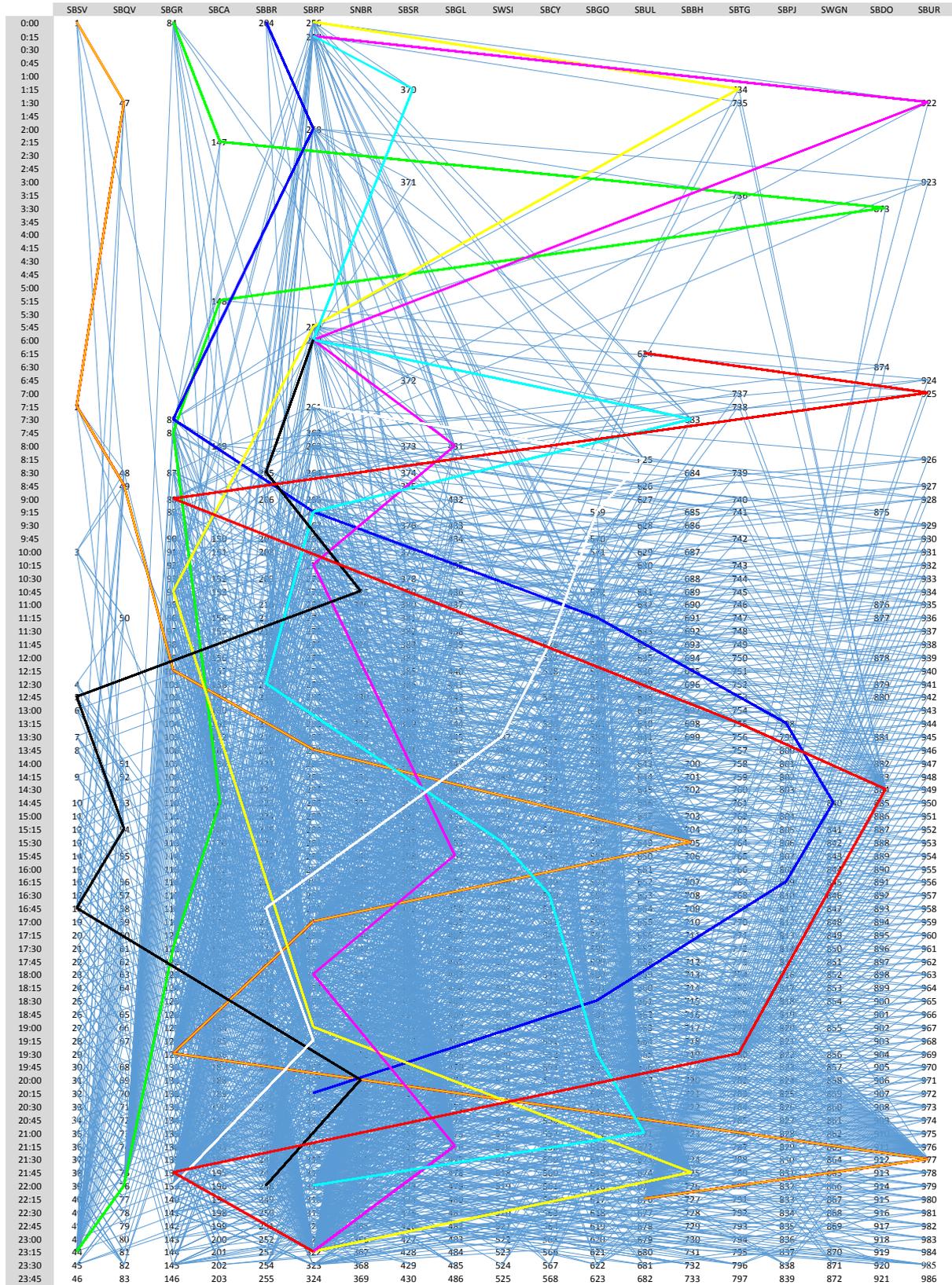


Figura 5.7: Rede tempo-espaço com banda de 15 min
 Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.6: Sequenciamento normal das aeronaves para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min em cumprimento dos voos previstos na Tabela 4.1

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
1	1	47	2228
	47	2	2229
	2	49	22231
	49	100	22232
	100	284	2264
	284	705	2273
	705	297	2272
	297	129	2269
	129	977	23721
977	676	23722	
2	84	147	23461
	147	873	23462
	873	148	23471
	148	86	23472
	86	167	2344
	167	121	2345
	121	76	22241
76	44	22242	
3	204	258	22314
	258	85	22612
	85	266	23161
	266	573	23162
	573	798	23163
	798	840	23164
	840	809	23171
	809	602	23172
602	310	23173	
4	256	734	22602
	734	259	22611
	259	94	2267
	94	305	2266
	305	725	2279
	725	322	2278
5	257	922	2340
	922	260	2341
	260	431	2254
	431	270	2253
	270	454	2258
	454	301	2259
	301	476	2252
476	322	2257	
	257	370	2204
	370	260	2205
	260	683	2271
	683	266	2270

Continua na próxima página

Tabela 5.6: (*Continuação*)

Aeronave	Nó de partida	Nó de chegada	Nº do voo
6	266	216	23781
	216	493	23782
	493	540	22561
	540	606	22562
	606	671	22563
	671	317	22564
7	260	205	22301
	205	325	22302
	325	5	22303
	5	54	22304
	54	18	22311
	18	354	22312
	354	248	22313
8	261	625	22551
	625	569	22552
	569	526	22553
	526	487	22554
	487	229	23791
	229	306	23792
	306	139	23174
9	624	925	23771
	925	88	23772
	88	755	23603
	755	884	23604
	884	780	23611
	780	138	23612
	138	322	22601

Fonte: Próprio autor, 2015

Tabela 5.7: Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 15 min

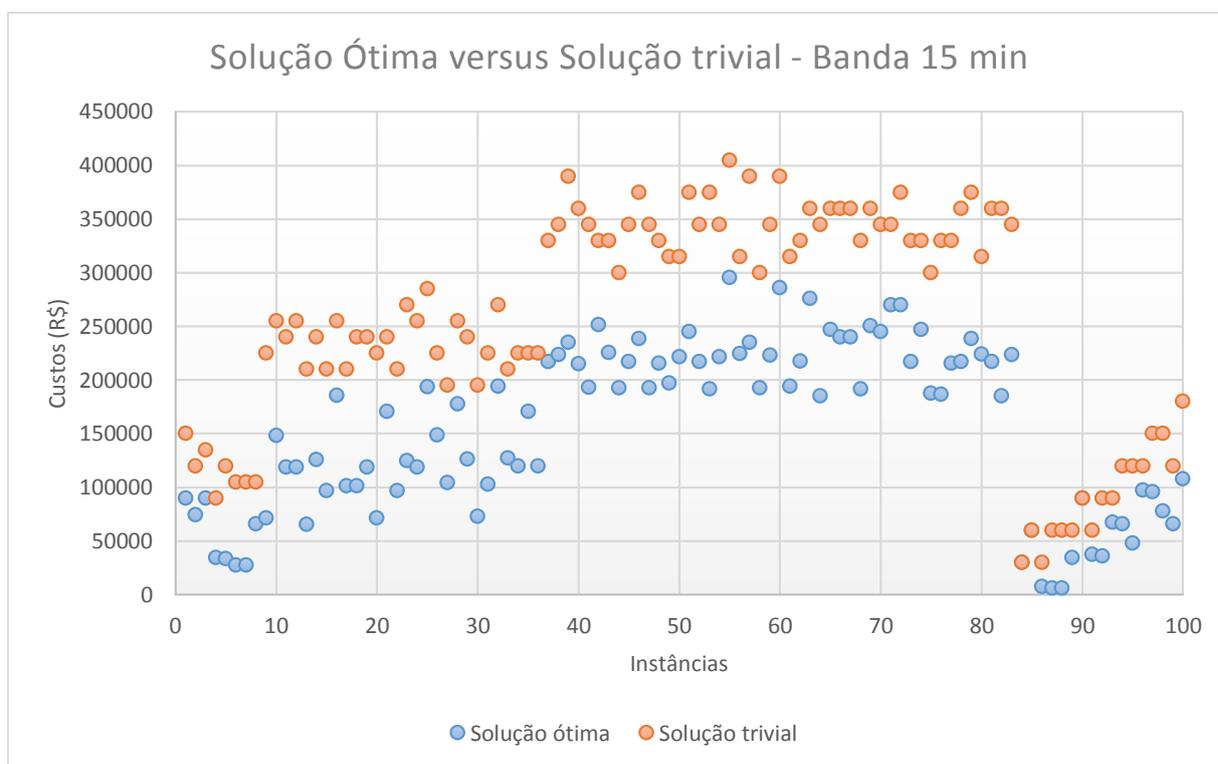
Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min			
INDISP-1	INDISP-84	INDISP-204	INDISP-256
INDISP-257	INDISP-260	INDISP-261	INDISP-624
INDISP-260-257	INDISP-257-204	INDISP-204-260	INDISP-1-260
INDISP-261-260	INDISP-1-256	INDISP-624-261	INDISP-1-624
INDISP-256-257	INDISP-257-257	INDISP-204-261	INDISP-261-257
INDISP-624-204	INDISP-260-624	INDISP-257-1	INDISP-1-261
INDISP-204-1	INDISP-204-256	INDISP-624-256	INDISP-204-84
INDISP-84-257	INDISP-256-260	INDISP-257-624	INDISP-1-84
INDISP-256-84	INDISP-84-261	INDISP-624-84	INDISP-84-260
INDISP-84-624-261	INDISP-257-260-84	INDISP-204-1-261	INDISP-261-204-257
INDISP-257-261-257	INDISP-84-256-257	INDISP-256-257-257	INDISP-624-261-256
INDISP-261-624-204	INDISP-84-260-1	INDISP-256-260-1	INDISP-204-256-261
INDISP-256-260-257	INDISP-256-624-257	INDISP-257-204-257	INDISP-204-260-624
INDISP-261-1-257	INDISP-624-257-257	INDISP-204-1-84	INDISP-256-260-84

Continua na próxima página

Tabela 5.7: (Continuação)

Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min			
INDISP-1-204-260	INDISP-624-256-260	INDISP-84-257-624	INDISP-624-1-204
INDISP-257-261-256	INDISP-261-260-84	INDISP-84-204-624	INDISP-260-204-261
INDISP-624-204-257	INDISP-204-261-84	INDISP-204-84-260	INDISP-257-624-261
INDISP-257-257-84	INDISP-257-256-204	INDISP-256-204-84	INDISP-204-84-257
INDISP-260-624-84	INDISP-624-204-256	INDISP-261-260-256	INDISP-260-261-257
INDISP-204-260-256	INDISP-624-1-261	INDISP-261-1-84	INDISP-256-84-624
INDISP-1-624-260	INDISP-261-1-260	INDISP-261-84-257	DISP-2
DISP-86	DISP-259	DISP-270	DISP-266
DISP-305	DISP-2-86	DISP-2-259	DISP-2-270
DISP-86-259	DISP-86-270	DISP-270-266	DISP-2-86-259
DISP-86-259-270	DISP-259-270-266	DISP-2-259-266	DISP-86-270-266

Fonte: Próprio autor, 2015

Figura 5.8: Solução ótima *versus* solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min

Fonte: Próprio autor, 2015

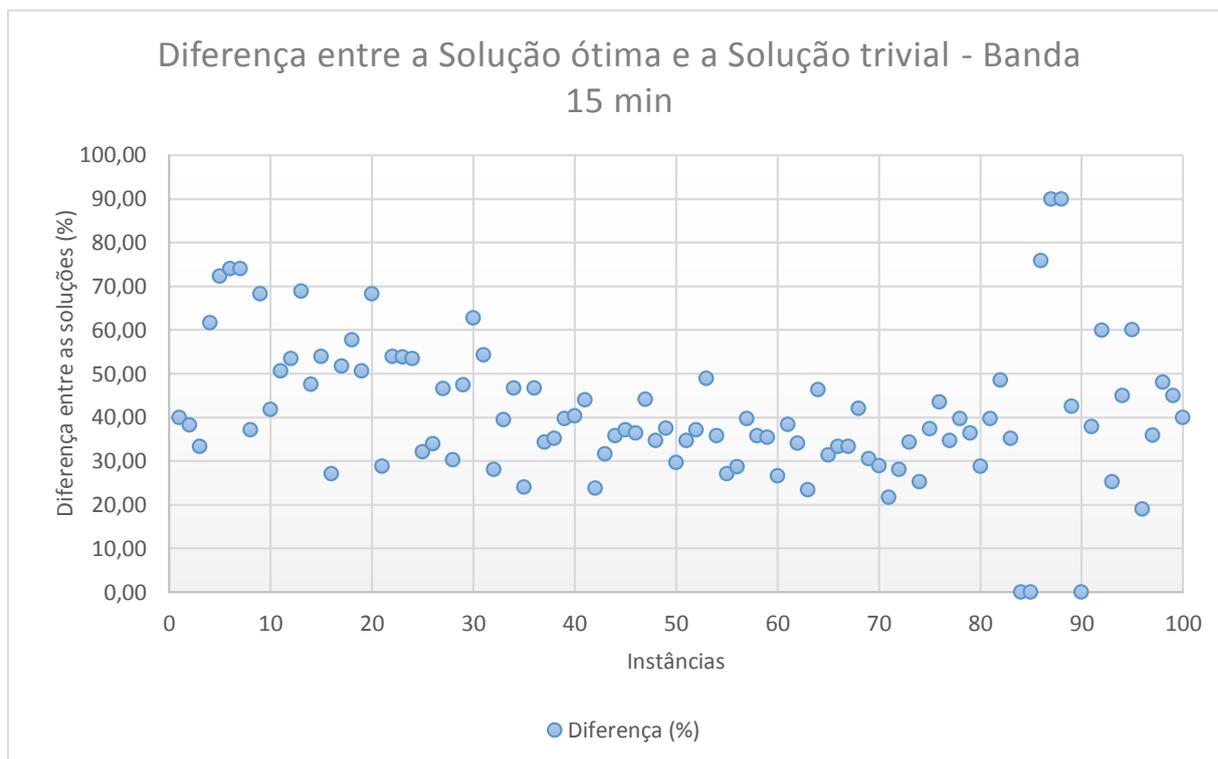


Figura 5.9: Diferença percentual entre a solução ótima e a solução trivial para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min

Fonte: Próprio autor, 2015

5.4 REDE TEMPO-ESPAÇO COM BANDA DE 15 min E AERONAVE RESERVA

A resolução do ARP para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min e aeronave reserva possui as mesmas características da rede tempo-espaço com banda de 15 min sem aeronave reserva no que se referem ao número de bandas, número de nós e de arcos, sequenciamento das 9 aeronaves da frota em operações normais e os nós de suprimento e de demanda na rede tempo-espaço.

A diferença nesta abordagem está em disponibilizar uma aeronave reserva no nó 256, localizada em SBRP, como forma de dar a opção da companhia aérea utilizar essa aeronave adicional em situações de indisponibilidade das outras aeronaves. O aeroporto SBRP foi selecionado para dispor de uma aeronave a mais por possuir 17 voos diários de saída e assim representar o aeroporto de maior movimento entre os outros operados pela companhia aérea.

Das 100 instâncias testadas para a análise do ARP para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min, 95 delas foram testadas para essa mesma configuração de rede

acrescida de uma aeronave reserva. As instâncias testadas são aquelas apresentadas na Tabela 5.8.

A Figura 5.10 apresenta o comparativo entre as soluções ótimas para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min com aeronave reserva e sem aeronave reserva. Para todas as instâncias testadas as soluções ótimas dos casos com aeronave reserva foram menores do que os casos sem aeronave reserva.

A diferença média percentual entre as duas soluções ótimas encontradas para as instâncias testadas foi de **38,68%** e a Figura 5.11 representa as diferentes situações.

Apesar de as soluções ótimas encontradas para as situações com aeronave reserva terem se mostrado aparentemente vantajosas, é importante ressaltar que existem elevados custos para a companhia aérea adquirir e manter uma aeronave a mais para suprir situações de indisponibilidades de outras aeronaves. Assim, essa abordagem de aeronave reserva pode servir para a companhia aérea realizar estudos comparativos mais aprofundados ao longo de um período de tempo, e levando em conta o seu histórico de interrupções das operações, sobre viabilidade financeira ou não do emprego de uma aeronave a mais na sua frota.

Tabela 5.8: Instâncias que representam a indisponibilidade de aeronaves em diferentes nós numa rede tempo-espaço com banda de 15 min e aeronave reserva

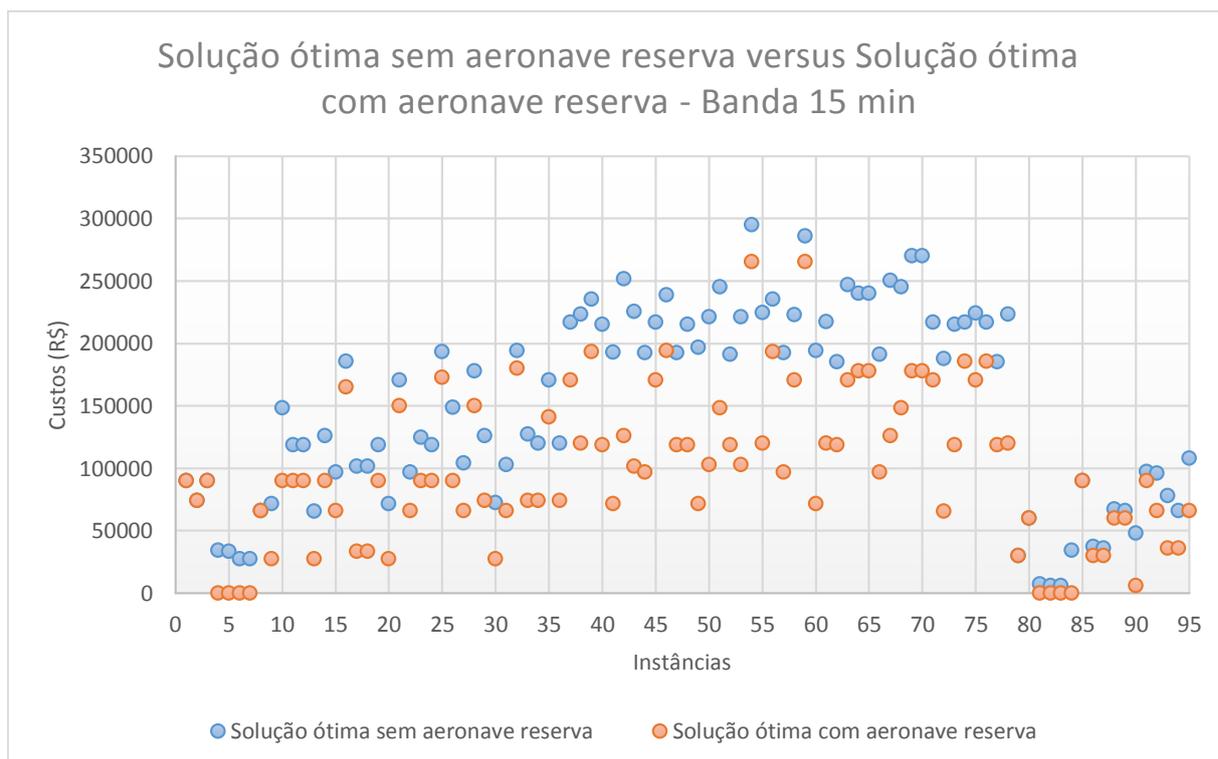
Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min e aeronave reserva			
INDISP-1	INDISP-84	INDISP-204	INDISP-256
INDISP-257	INDISP-260	INDISP-261	INDISP-624
INDISP-260-257	INDISP-257-204	INDISP-204-260	INDISP-1-260
INDISP-261-260	INDISP-1-256	INDISP-624-261	INDISP-1-624
INDISP-256-257	INDISP-257-257	INDISP-204-261	INDISP-261-257
INDISP-624-204	INDISP-260-624	INDISP-257-1	INDISP-1-261
INDISP-204-1	INDISP-204-256	INDISP-624-256	INDISP-204-84
INDISP-84-257	INDISP-256-260	INDISP-257-624	INDISP-1-84
INDISP-256-84	INDISP-84-261	INDISP-624-84	INDISP-84-260
INDISP-84-624-261	INDISP-257-260-84	INDISP-204-1-261	INDISP-261-204-257
INDISP-257-261-257	INDISP-84-256-257	INDISP-256-257-257	INDISP-624-261-256
INDISP-261-624-204	INDISP-84-260-1	INDISP-256-260-1	INDISP-204-256-261
INDISP-256-260-257	INDISP-256-624-257	INDISP-257-204-257	INDISP-261-1-257
INDISP-624-257-257	INDISP-204-1-84	INDISP-256-260-84	INDISP-1-204-260
INDISP-624-256-260	INDISP-84-257-624	INDISP-624-1-204	INDISP-257-261-256
INDISP-261-260-84	INDISP-260-204-261	INDISP-624-204-257	INDISP-204-261-84
INDISP-204-84-260	INDISP-257-624-261	INDISP-257-257-84	INDISP-257-256-204
INDISP-256-204-84	INDISP-204-84-257	INDISP-624-204-256	INDISP-261-260-256
INDISP-204-260-256	INDISP-624-1-261	INDISP-256-84-624	INDISP-1-624-260

Continua na próxima página

Tabela 5.8: (Continuação)

Instâncias para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min e aeronave reserva			
INDISP-261-1-260	INDISP-261-84-257	DISP-2	DISP-86
DISP-259	DISP-270	DISP-266	DISP-305
DISP-2-86	DISP-2-259	DISP-2-270	DISP-86-259
DISP-86-270	DISP-270-266	DISP-2-86-259	DISP-86-259-270
DISP-259-270-266	DISP-2-259-266	DISP-86-270-266	

Fonte: Próprio autor, 2015

Figura 5.10: Solução ótima sem aeronave reserva *versus* solução ótima com aeronave reserva para uma rede tempo-espaço com banda de 15 min

Fonte: Próprio autor, 2015

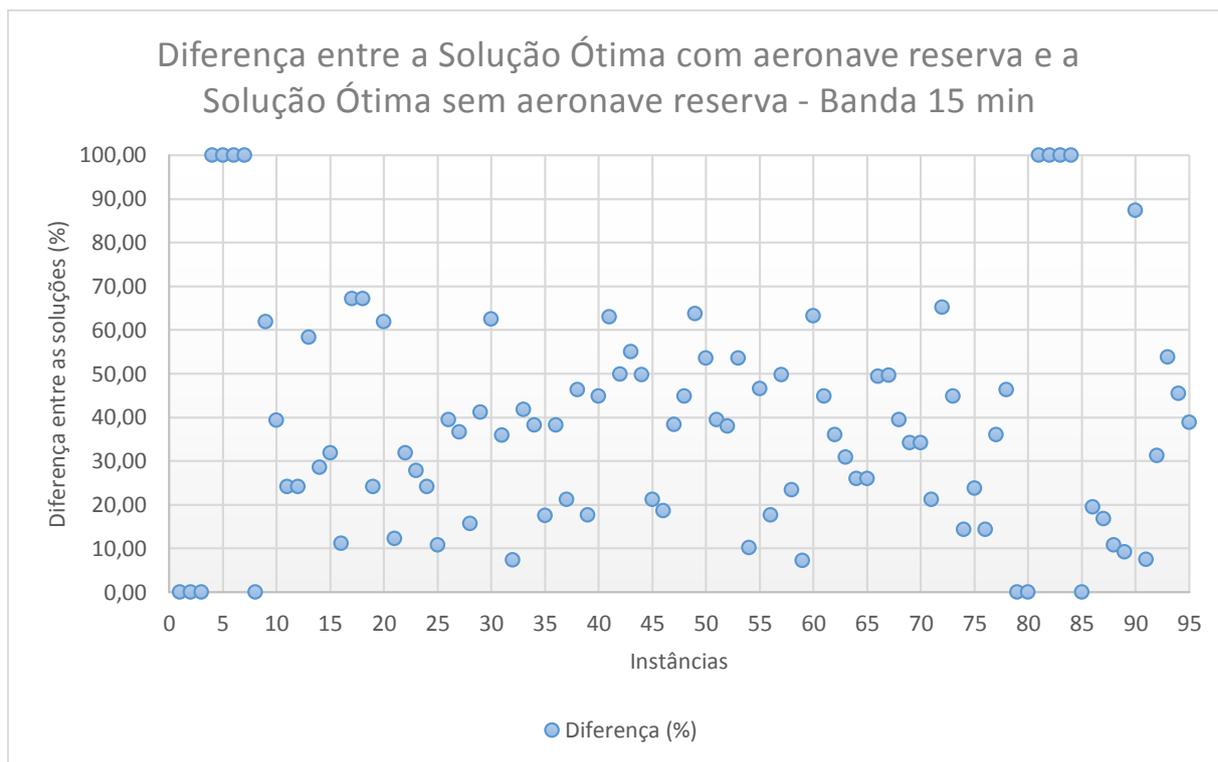


Figura 5.11: Diferença percentual entre a solução ótima sem aeronave reserva e a solução ótima com aeronave reserva para a rede tempo-espaço com banda de 15 min

Fonte: Próprio autor, 2015

5.5 COMPARATIVO ENTRE AS REDES COM DIFERENTES TAMANHOS DE BANDAS

A Tabela 5.9 apresenta as informações comparativas entre os tamanhos de bandas de 30 min, 20 min e 15 min para a construção das redes tempo-espaço no que se referem ao número de bandas, de nós e de arcos, diferenças médias entre as soluções ótimas e as soluções triviais e o tempo de processamento médio para a resolução de uma instância. Na última linha dessa tabela também é apresentada a diferença média entre as soluções ótimas para o caso da rede tempo-espaço com banda de 15 min sem aeronave reserva e com aeronave reserva.

A partir dos dados comparativos, é possível observar que o tempo de processamento para a resolução de uma instância do ARP é maior quanto maior forem os números de nós e de arcos envolvidos na análise. Entretanto, a diferença entre as soluções ótimas e as soluções triviais é maior quanto menor for o tamanho da banda empregado. Isso indica que quanto menor for a banda, melhor será a solução ótima encontrada devido a maior

quantidade de alternativas de voos analisadas para o cumprimento dos voos programados.

Assim, para o porte da companhia aérea analisada, a metodologia adotada para a resolução do ARP se mostrou adequada para um rede tempo-espaco construída com uma banda de 15 min e nas 100 instâncias testadas apresentou resultados médios **41,15%** melhores do que as soluções triviais para esse mesmo tamanho de banda. O tempo médio de resolução para cada instância analisada foi de 100s.

O emprego de uma aeronave reserva no aeroporto SBRP para um rede com uma banda de 15 min resultou numa melhoria média de **38,68%** nas 95 instâncias testadas em relação aos resultados obtidos para um rede com banda de 15 min sem aeronave reserva. Vale salientar que essa melhoria aparente não é conclusiva, pois a companhia aérea precisa analisar a viabilidade financeira de se adquirir e manter uma aeronave a mais na sua frota.

Tabela 5.9: Soluções ótimas *versus* soluções triviais e solução ótima sem aeronave reserva *versus* solução ótima com aeronave reserva para a rede tempo-espaco com banda de 15 min

Banda (min)	Nº bandas	Nº nós	Nº arcos	Diferença das soluções (%)	Tempo (s)
30	48	532	1998	38,24	30
20	72	768	2838	40,44	60
15	96	986	3615	41,15	100
Rede tempo-espaco com banda de 15 min e aeronave reserva					
Banda (min)	Nº bandas	Nº nós	Nº arcos	Diferença das soluções (%)	Tempo (s)
15	96	986	3615	38,68	100

Fonte: Próprio autor, 2015

6 CONCLUSÃO

Essa dissertação propôs uma solução para o ARP de companhias aéreas regulares de pequeno porte, conforme estabelecido na Seção 1.3, a partir dos dados da empresa PASSAREDO e da metodologia abordada por Arguello et al (1998) e por Bard et al (2001). Essa metodologia consistiu na construção de uma rede tempo-espço a partir da programação dos voos e da formulação matemática baseada nos princípios do problema de fluxo de custo mínimo.

As redes tempo-espço foram construídas com bandas de 30 min, 20 min e 15 min e, a partir da geração de instâncias que previam a indisponibilidade de até 3 aeronaves em diferentes nós da rede, foram determinados os novos sequenciamentos das aeronaves, os voos que deveriam ser cancelados (se fosse o caso) e o posicionamento final das aeronaves para darem continuidade às operações no dia seguinte. Essa configuração deve implicar no menor valor do somatório dos custos por atraso e/ou cancelamentos dos voos programados para ocorrerem num determinado dia de operação.

Além dessas bandas, também foi testada a possibilidade do emprego de uma aeronave reserva numa rede com banda de 15 min como forma de verificar se as soluções eram melhores do que se não fosse empregada a aeronave reserva nessa mesma rede tempo-espço.

As soluções obtidas para o caso da rede construída a partir da banda com 15 min foram, em média, 41,15% menores do que as soluções triviais para as 100 instâncias testadas. Esse resultado foi melhor devido a análise ter sido feita numa faixa mais estreita de tempo e assim considerar mais alternativas de realização dos voos programados. As solu-

ções obtidas com o empregado de uma aeronave reserva também se mostraram atrativas. Das 95 instâncias testadas igualmente para a situação sem aeronave reserva, em média as soluções foram 38,68% menores. No entanto, esse benefício não é conclusivo por ser necessária uma análise de viabilidade financeira mais detalhada por parte da companhia aérea.

A inclusão de uma aeronave reserva nas resoluções das instâncias de indisponibilidades de aeronaves pode servir como ferramenta de análise das empresas. É possível a comparação dos custos de aquisição e disponibilização de uma aeronave com os custos indesejáveis poupados pelo emprego de uma aeronave a mais na frota.

A ênfase deste estudo foi dada na recuperação de aeronave por representar o principal insumo produtivo das companhias aéreas. É natural que, em situações de interrupções, a definição do novo sequenciamento das aeronaves da frota seja a primeira e principal preocupação.

Foi identificado que nem sempre os estudos atuais sobre o assunto são dedicados à aeronave e claros suficientemente para generalizações. Assim, a metodologia apresentada permite a generalização para outras companhias aéreas de pequeno porte, bem como a fácil comparação dos resultados obtidos com as soluções conceitualmente definidas como triviais. Além disso, devido a característica de resolução exata, essa metodologia pode ser empregada até o seu limite máximo de nós e arcos para a comparação com metaheurísticas desenvolvidas para a resolução de problemas maiores.

Trabalhos futuros podem empregar metaheurísticas para a resolução do ARP em situações que envolvam um elevado número de aeronaves, de voos e de aeroportos operados por uma companhia aérea brasileira. Arguello et al (1997) também apresentam outro estudo que acopla a metodologia da rede tempo-espço com uma GRASP para a resolução do ARP em tempo computacional factível envolvendo companhias de maior porte.

Outros trabalhos podem ser desenvolvidos analisando a rede tempo-espço não mais estática, ou seja, construída e analisada a partir de uma programação definida, mas sim reiteradamente reconstruída após a ocorrência não só de indisponibilidade de aeronaves durante um período de tempo, mas também devido ao atraso de aeronaves ao longo do dia

de operação. A avaliação do ARP a partir de situações reais vivenciadas nas companhias aéreas também representa uma grande oportunidade de validação das possíveis ferramentas empregadas para a resolução desse tipo de problema.

Pode-se analisar também a possibilidade de melhoria do cálculo dos custos por atraso e cancelamento dos voos. Quanto ao cálculo do custo por atraso, a estimativa do custo por unidade de tempo pode ser mais adequada se forem levadas em conta as particularidades das operações brasileiras. E quanto ao cálculo do custo por cancelamento dos voos, a estimativa do custo do voo cancelado pode ser melhorada se forem considerados os impactos individuais de cada voo cancelado e não mais uma estimativa única e homogênea para todos eles.

Outra oportunidade de melhoria da metodologia apresentada é passar a considerar a realização de voos de traslado de algumas aeronaves como forma de auxiliar na recuperação das operações após a ocorrência de interrupções. O voo de traslado é entendido como aquele realizado sem passageiros a bordo e entre aeroportos que não necessariamente possuam voos previamente programados.

Por fim, o acoplamento do ARP com os problemas de recuperação de tripulantes e de passageiros e a otimização do planejamento da manutenção entre as bases de manutenção situadas nos aeroportos operados pela companhia aérea, representa um importante problema a ser tratado por relacionar alguns dos mais importantes insumos operacionais ao seu maior sentido de existir: os passageiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC. *Anuário do Transporte Aéreo 2013, volume único, primeira edição*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2013.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. Editora Elsevier, 2007.
- ARGUELLO, M.; BARD, J.; YU, G. A grasp for aircraft routing in response to groundings and delays. *Journal of Combinatorial Optimization*, v. 1, n. 3, p. 211–228. ISSN 1382-6905. doi: 10.1023/A:1009772208981, 1997.
- ARGUELLO, M.; BARD, J.; YU, G. Models and methods for managing airline irregular operations. YU, G. (Ed.), *Operations Research in the Airline Industry*, volume 9 of *International Series in Operations Research Management Science*, p. 1–45. Springer US, 1998.
- ARIKAN, U.; GÜREL, S.; AKTÜRK, M. S. Integrated aircraft and passenger recovery with cruise time controllability. *Annals of Operations Research*, p. 1–23, 2013.
- BARD, J.; YU, G.; ARGUELLO, M. Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays. *IIE Transactions*, v. 33, n. 10, p. 931–947. ISSN 0740-817X, 2001.
- BATALHA, M. O. *Introdução à engenharia de produção*. Elsevier, 2008.
- BAZARGAN, M. *Airline Operations and Scheduling*, Capítulo Network Flows and Integer Programming Models and Airline Irregular Operations. Ashgate, 2010.
- BELOBABA, P.; ODoni, A.; BARNHART, C. *The global airline industry*, volume 23. John Wiley & Sons, 2009.

- BISAILLON, S.; CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G.; PASIN, F. A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem. *4OR*, v. 9, n. 2, p. 139–157. ISSN 1619-4500. doi: 10.1007/s10288-010-0145-5. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10288-010-0145-5>, 2011.
- CASTRO, A. J.; OLIVEIRA, E. Airline operations control: A new concept for operations recovery. *Airline Industry: Strategies, Operations and Safety*, v. 1, 2011.
- CLARKE, M. D. D. Irregular airline operations: a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers. *Journal of Air Transport Management*, v. 4, n. 2, p. 67–76, 1998.
- CLAUSEN, J.; LARSEN, A.; LARSEN, J.; REZANOVA, N. J. Disruption management in the airline industry - concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 5, p. 809–821, 2010.
- COOK, A.; TANNER, G. *Standard Inputs for EUROCONTROL Cost Benefit Analyses*. Department of Transport Studies University of Westminster, University of California, Riverside, 2013.
- DECRETO 21.713. *Convenção sobre aviação civil internacional*. Presidência da República, 1946.
- DECRETO 3.564. *Dispõe sobre a estrutura e o funcionamento do Conselho de Aviação Civil e dá outras providências*. Presidência da República, 2000.
- DECRETO 7.476. *Função da Secretaria de Aviação Civil da Presidência da República*. Presidência da República, 2011.
- ESTATUTO SOCIAL DA INFRAERO. *Estatuto Social da INFRAERO*. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, 2015.
- FAA. *Airline On-Time Statistics and Delay Causes*. Federal Aviation Administration, 2015.
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. Atlas, 2007.

- GUIMARANS, D.; ARIAS, P.; MOTA, M. M. Large neighbourhood search and simulation for disruption management in the airline industry. *Applied Simulation and Optimization*, p. 169–201. Springer, 2015.
- HANSEN, M.; ZOU, B. *Airport Operational Performance and Its Impact on Airline Cost*, p. 119–143. John Wiley Sons. ISBN 9781118535844. doi: 10.1002/9781118535844.ch5. URL <http://dx.doi.org/10.1002/9781118535844.ch5>, 2013.
- HU, Y.; XU, B.; BARD, J. F.; CHI, H. ET AL. Optimization of multi-fleet aircraft routing considering passenger transiting under airline disruption. *Computers & Industrial Engineering*, v. 80, p. 132–144, 2015.
- IAC-1223. *Instrução de Aviação Civil - Normas para confecção e aprovação de HOTRAN*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2000.
- IAC-1224. *Normas para alterações em voos regulares e realização de voos não-regulares*. Agência Nacional de Aviação Civil, 1999.
- IAC-1502. *Estabelece procedimentos com vistas à avaliação da regularidade, da pontualidade e da eficiência operacional das empresas brasileiras de transporte aéreo regular*. Agência Nacional de Aviação Civil, 1999.
- ICAO. *ICAO Strategic Objectives 2014-2016*. International Civil Aviation Organization, 2014.
- KAUARK, F.; MANHAES, F.; MEDEIROS, C. *Metodologia da pesquisa: um guia prático*, p. 88. Via Litterarum, 2010.
- KOHL, N.; LARSEN, A.; LARSEN, J.; ROSS, A.; TIOURINE, S. Airline disruption management—perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, v. 13, n. 3, p. 149–162, 2007.
- LEI 11.182. *Cria a Agência Nacional de Aviação Civil e dá outras providências*. Presidência da República, 2005.

- LEI 12.462. *Altera a Lei 10.683, de 28 de maio de 2003, que dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios e a legislação da Agência Nacional de Aviação Civil*. Presidência da República, 2011.
- LEI 7.565. *Código Brasileiro de Aeronáutica*. Presidência da República, 1986.
- LUCENA, A.; PONTES, R. Aviação comercial controlada por máquinas inteligentes. *E-papers, Rio de Janeiro: E-papers*, p. 15–23, 2007.
- MAHER, S. J. A novel passenger recovery approach for the integrated airline recovery problem. *Computers & Operations Research*, p. 123–137, 2014a.
- MAHER, S. J. Solving the integrated airline recovery problem using column-and-row generation. *Transportation Science*, v. 0, n. 0, p. null. doi: 10.1287/trsc.2014.0552. URL <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.2014.0552>, 2014b.
- MCKINSEY&COMPANY. Estudo do setor de transporte aéreo do Brasil, primeira edição. Relatório técnico, McKinseyCompany, 2010.
- MELCHERS, R. E. On the alarp approach to risk management. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 71, n. 2, p. 201–208, 2001.
- NEXTOR. *A Comprehensive Assessment of de Costs and Impacts of Flight Delay in the United States*. National Center of Excellence for Aviation Operations Research, 2010.
- NICKKAR, A.; SEYED-HOSSEINI, S.; JAVANSHIR, H.; KHAKSAR, H. Developing a model for solving the flight perturbation problem. *Journal of Airline and Airport Management*, v. 5, n. 1, p. 18–38, 2015.
- PETERSEN, J. D.; SÖLVELING, G.; CLARKE, J.-P.; JOHNSON, E. L.; SHEBALOV, S. An optimization approach to airline integrated recovery. *Transportation Science*, v. 46, n. 4, p. 482–500, 2012.
- RBAC-01. *Regulamento Brasileiro de Aviação Civi - Definições, regras de redação e unidades de medida*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2011.

- RBAC-119. *Regulamento Brasileiro de Certificação Aeronáutica - Certificação: operadores regulares e não-regulares*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2010.
- RBAC-121. *Regulamento Brasileiro de Certificação Aeronáutica - Requisitos operacionais: operações domésticas, de bandeira e suplementares*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2010.
- RBAC-135. *Regulamento Brasileiro de Certificação Aeronáutica - Requisitos operacionais: operações complementares e por demanda*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2010.
- RBHA-91. *Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica - Regras gerais de operação para aeronaves civis*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2011.
- RESOLUÇÃO 141. *Dispõe sobre as Condições Gerais de Transporte aplicáveis aos atrasos e cancelamentos de voos e às hipóteses de preterição de passageiros*. Agência Nacional de Aviação Civil, 2010.
- SAC. *O setor aéreo*. Secretaria de Aviação Civil, 2015.
- SOUZA, M. J. F. Inteligência computacional para otimização. *Notas de aula, Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, disponível em <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>*, 2008.
- TAHA, H. A. *Pesquisa Operacional: uma visão geral*. Pearson Prentice Hall, São Paulo. ISBN 978-85-7605-150-3, 2008.
- TEODOROVIĆ, D.; GUBERINIĆ, S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, v. 15, n. 2, p. 178–182, 1984.