

ALOCÇÃO DE AERONAVES PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM UMA COMPANHIA AÉREA BRASILEIRA

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de otimização que tem como objetivo minimizar o consumo de combustível de uma companhia aérea, incluindo a alocação de frotas e programação dos voos, considerando as devidas restrições, utilizando competências da Engenharia de Produção aliadas na gestão dos processos e pesquisa operacional para realização de planejamentos e controles que garantam a redução de custos e ganhos de desempenho. O modelo, baseado em programação linear inteira, visa às questões que envolvem as características de cada tipo de aeronave da empresa analisada juntamente com os dados estatísticos de demanda dos voos operados pela companhia. O modelo foi testado e aplicado com sucesso a um estudo de caso de uma empresa aérea brasileira.

PALAVRAS CHAVE. Alocação de Aeronaves, Modelagem matemática, Pesquisa Operacional.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present an optimization model that aims to minimize the fuel consumption of an airline, including fleet allocation and flight scheduling, considering the constraints, using Production Engineering competencies allied to process management and operational research to carry out the planning and controls that guarantee the reduction of costs and performance gains. The model, based on integer linear programming, addresses the issues involving the characteristics of each type of aircraft of the company analyzed together with the statistical data of demand of the flights operated by the company. The model was successfully tested and applied to a case study of a Brazilian airline.

KEYWORDS. Allocation of aircraft, Mathematical modeling. Operational Research.

1. Introdução

A agilidade e a rapidez no transporte de cargas, pessoas e informações, tornaram-se condições essenciais para a existência da sociedade após o século XX e, no exercício do atendimento de suas necessidades, poucos setores desempenharam papel de tanta magnitude como do transporte aéreo. O destaque desse modo de transporte está diretamente relacionado às suas particularidades como a velocidade, eficiência, segurança e sua capacidade de cobertura.

Principalmente em ligações de média e longa distância, é notável a importância do transporte aéreo quando se refere à agilidade e dinamismo no transporte de pessoas. Contudo, as exigências estabelecidas pelas normas internacionais de segurança e os custos elevados relacionados a esse tipo de transporte, acabam impondo-lhe uma série de restrições.

O transporte aéreo no Brasil começou a ser explorado durante a década de 1920 e desde então se desenvolveu rapidamente. Com o fim da Segunda Guerra, muitas companhias foram criadas no país. Os diversos problemas econômicos enfrentados no Brasil foram cruciais para os problemas econômicos enfrentados pelo setor. Atualmente, infraestrutura aeroportuária é o principal gargalo para o setor aéreo brasileiro [Neto e Souza 2011]. Além de novos aeroportos, é necessário espaço terrestre para que haja eficiência na operação. Ainda com obras de ampliação, muitos terminais ainda permanecerão deficientes de pátios. Isso implica em maior custo operacional.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas Aéreas [ABAER 2017], nos últimos 12 anos, o Brasil triplicou o volume de passageiros transportados utilizando praticamente a mesma infraestrutura aeroportuária existente.

Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil [ANAC 2018], a necessidade de transporte de passageiro e carga aumentou consideravelmente com o desenvolvimento econômico. Com isso as empresas ampliaram a oferta de assentos/voos nas principais ligações aéreas, e também investem em novas tecnologias em função dos desafios econômicos e operacionais.

Alguns fatores, como oscilações econômicas e alterações inesperadas nos custos de produção interferem diretamente no resultado financeiro das empresas aéreas. Devido a essas variações as empresas buscam constantemente ganhos de eficiência, controlando capacidade produtiva para sobreviverem em um mercado extremamente competitivo e exigente. Para competir em preços as empresas precisam administrar minuciosamente os seus custos. As operações aéreas primeiramente envolvem entender como se criam os voos e quais os fundamentos abrangidos na definição da malha aérea.

Basicamente, a gestão refere-se à alocação da demanda (passageiro/carga) à oferta (aeronaves disponíveis). A malha aérea é constituída pelo conjunto de voos criados e o tipo de rede aérea que será operada, por exemplo, se será voos diretos, com escala, com conexão ou com empresas parceiras.

No setor de transporte aéreo o progresso depende da melhoria contínua dos processos de produção e da inserção de inovação. Além de ser uma exigência operacional, a tecnologia pode ser associada a processos de gerenciamento e otimização, a fim de obter ganhos de escala de produção e, subsequente, a redução de custos, melhorando assim a eficiência econômica, o que impacta na melhoria dos resultados financeiros.

Um importante fator na redução dos custos de uma companhia aérea é o uso apropriado da frota disponível com a adequação técnica e econômica, diminuindo assim os custos operacionais e os impactos ambientais inerentes à atividade de transporte aéreo e atingindo a eficiência operacional e a sustentabilidade do setor.

Nesse momento destaque-se a preocupação com relação aos níveis de emissões de poluentes resultante de uma má utilização da frota existente, refletindo uma baixa eficiência energética para o setor.

O trabalho busca contribuir com a minimização dos custos operacionais de uma empresa aérea através de seleção de aeronaves adequadas para cada rede de transportes, respondendo à pergunta: Qual o modelo de aeronave é capaz de atender a demanda de transporte de passageiros de uma origem para um respectivo destino com o menor consumo de combustível possível? Para isso, serão analisados os fatores relevantes na escolha de aeronaves para rotas com um problema

de modelagem matemática, em que função-objetivo é minimizar os custos com combustível, de modo a alocar a aeronave certa no lugar certo.

O método proposto visa às questões que envolvem as características de cada tipo de aeronave da empresa analisada juntamente com os dados estatísticos dos voos realizados em uma determinada região do país. A abordagem adotada nesta pesquisa é qualitativa, ou seja, aborda as questões tratadas a partir de seus conteúdos principais com dados quantitativos. Nesse sentido, adota o estudo de caso como instrumento analítico empírico. A fonte de coleta de dados é a bibliografia especializada.

2. Fundamentos Operacionais da aviação comercial

2.1. Os tipos de redes aéreas

As sobras de aeronaves depois da segunda guerra mundial fizeram com que estas fossem utilizadas para fins domésticos. Até o final dos anos 80, a rede aérea do tipo ponto a ponto era mais utilizada. Nesse modelo de rede não existem conexões previstas e as rotas podem ser operadas independentemente, sendo que o tráfego aéreo em cada uma delas não é necessariamente afetado pela demanda por outras rotas. Com a evolução das aeronaves, outros tipos de redes surgiram para suprir novas necessidades. As redes mais utilizadas hoje em dia são as Lineares e Hub and Spoke.

2.1.1 Lineares

As redes lineares operam voos diretos ou com escala. Atende voos de cidades primárias para primárias ou para secundárias, ou de secundárias para secundárias. Este modelo ainda é utilizado na aviação regional. A aeronave percorre várias cidades até chegar em um grande centro. Ele tem como vantagens a necessidade de baixa infraestrutura e o baixo risco de extravio de bagagens [Fonseca e Gomes 2015]. E a desvantagem é que não há voos para todos os locais, e também pode ser que haja um grande número de paradas em aeroportos no caminho até chegar em um certo destino final que se localiza no final da linha.

2.1.2 Hub and Spoke

O modelo Hub and Spoke consiste em um ou mais aeroporto central (hub), que leva os passageiros para um destino final (spoke) [Fonseca e Gomes 2015]. Um elemento central interligando a maioria das cidades proporciona maior utilização das aeronaves e também aumenta a possibilidade de viagens ofertada pela empresa. Para o modelo H&B ser eficiente, uma logística de horários deve ser seguida com a menor quantidade de atraso possível, garantindo a sincronização entre os horários de saída e chegada dos voos. O modelo proporciona taxa de ocupação superior, se comparado ao linear, maior utilização de mão de obra e ativos de oportunidade, amplia a quantidade de destinos e gera economias de escala, já que uma grande quantidade de pessoas se concentra em um mesmo aeroporto. Mas os hubs devem ser centros com alta tecnologia e infraestrutura, já que irão atender grande quantidade de clientes, e os erros devem ser reduzidos para garantir o funcionamento do tipo de rede.

2.2. Planejamento operacional

O processo de Planejamento estratégico das companhias aéreas tem como objetivo maximizar a rentabilidade da empresa através da tomada de decisões relacionadas à tripulação, alocação de aeronaves e rotas. Porém esse processo é de extrema complexidade devido ao número de restrições e variáveis que devem ser consideradas.

De acordo com a literatura alguns modelos de otimização utilizando pesquisa operacional foram desenvolvidos para auxiliar na tomada de decisão das empresas no processo de planejamento, porém segundo [Oliveira 2017], até o momento nenhum modelo de otimização foi resolvido, ou ao menos formulado na sua globalidade. Dessa forma, para encontrar boas soluções, o planejamento operacional de empresas aéreas pode ser dividido em três grandes problemas inter-relacionados: a definição de quais voos serão oferecidos, quais aeronaves farão quais voos e quais serão os tripulantes destes voos.

2.2.1 Definição dos Voos

Para a definição dos voos, a previsão da demanda e as regras internas de cada aeroporto devem ser consideradas. Há aeroportos que se localizam em áreas urbanas e não operam no turno da madrugada.

A capacidade operacional de cada aeroporto é outro fator a ser considerado. Para organizar a movimentação das aeronaves, são definidos horários em que cada companhia pode pousar ou decolar em cada aeródromo. Estes são definidos como slots [ANAC 2008]. A definição dos voos de acordo com as regras e condições de cada aeroporto é conhecido como Problema da geração de voos (Route Development Problem) [Rabetanety et al. 2006].

A empresa deve avaliar restrições de disponibilidade das aeronaves e tripulantes, e definir qual voo acontecerá em qual horário, gerando uma tabela. O planejamento de voos domésticos é realizado diariamente, enquanto a de voos internacionais semanalmente [Rabetanety et al. 2006; Klabjan 2004].

2.2.2 Alocação de Aeronaves

De acordo com a tabela de horário dos voos, são alocadas aeronaves de modo que seja possível criar séries de voos em uma mesma aeronave [Barnhart et al. 2003]. Considerando a demanda, a disponibilidade e o tempo mínimo em pátio, a alocação das aeronaves deve ser feita visando a maximização da receita ou a minimização dos custos. Este problema é conhecido como Problema da Alocação de Frota (Fleet Assignment Problem) [Rabetanety et al. 2006]. Este problema não define trajetos do voo, e nem quais serão as paradas para manutenção. É impreterível definir qual aeronave realizará cada trecho de cada voo. Estes trechos são chamados de trilhos, e cada voo de um trilho é denominado leg [Barnhart et al. 2003; Klabjan, 2004].

2.2.3 Alocação de Tripulantes

Os tripulantes devem ser alocados de acordo com os treinamentos exigidos e leis trabalhistas locais, visando à minimização dos custos com tripulação. É definida uma sequência de voos para cada tripulante, e estas são chamadas de Viagens, e sua definição gera o problema de definição de viagens (Crew Pairing Problem) [Gomes e Gualda 2008].

Depois de definir todas as viagens, definem-se as séries de viagens de cada tripulante, respeitando as restrições de treinamento e legislativo. A alocação de um piloto para uma viagem constitui o problema de escala de tripulantes (Crew Rostering Problem) [Klabjan 2004].

2.3. Produtividade da Frota

A produtividade da frota tem relação direta com a utilização que cada empresa aérea faz das suas aeronaves. De modo que, quanto maior for a taxa de utilização das aeronaves, maior a probabilidade de a companhia gerar receita [Oliveira 2017].

A taxa de aproveitamento de uma frota pode ser medida pelo número de passageiros voados por quilômetro, dividido pelo número de assentos ofertados por quilômetro.

2.3.1 Eficiência operacional

A eficiência operacional de um sistema de transporte aéreo decorre, essencialmente, do grau de adequação entre o tipo de aeronave utilizado e sua capacidade real de transporte para o tipo de ligação e frequência oferecida. [Barat 2004]. Como recurso de otimização para empresas a fim de aumentar os lucros operacionais e diminuir os custos, a Pesquisa operacional pode ser uma importante ferramenta na alocação de aeronaves.

Nas companhias aéreas esta análise é realizada, normalmente, por um engenheiro de operações de voo que define o conjunto de aeronaves viáveis através da análise um conjunto de parâmetros, como: alcance, consumo, capacidade dos tanques de combustível, velocidade, pesos máximos de decolagem/pouso, e capacidade de transporte de passageiros e carga. Tal análise é necessária para otimização dos recursos e redução dos custos operacionais, como ainda para possível renovação ou modificações na frota.

3. Análise de demanda e participação de mercado

Atuando em cenário altamente competitivo, as empresas aéreas não podem permitir nenhum tipo de ineficiência em suas operações. Por essa razão novos conceitos e práticas, bem como métodos e estruturas de baixo custo surgem a todo o momento. É preciso compreender o comportamento desse mercado para que se tomem decisões estratégicas que tornam as operações cada vez mais rentáveis. Algumas ferramentas de gestão juntamente com dados estatísticos podem ser usadas nesse estudo.

3.1. Curva S

Segundo [Gouveia 2016], quanto maior o número de assentos oferecidos por uma empresa aérea maiores serão as chances de ela absorver o mercado em expansão. Devido a proposição de que há um crescimento vegetativo natural dos mercados, acredita-se que as empresas, quando bem administradas, estão sujeitas ao crescimento. Ou seja, as empresas que ampliam a oferta de assentos também ampliaram a sua presença no mercado.

O conceito de Curva S pode ser usado para compreender melhor essa ideia. Destacam-se dois elementos: o capacity share e o market share, cujo estão diretamente associados. Ou seja, quanto maior o capacity share de uma empresa, maiores são as oportunidades de expansão do market share. O Capacity Share é o percentual de atuação de uma empresa, medida em termos de assento.quilometro, no total de assento.quilometro oferecido por todas as empresas no mercado. O market share indica a participação percentual da empresa, medida em passageiro.quilometro, no total de passageiro.quilometro transportado por todas as empresas. [Gouveia 2016]

Em resumo, estima-se que a participação no mercado das empresas que detém mais da metade da oferta no mercado aumente em proporção maior; do que a das empresas que detém participação menor que 50% da capacidade do mercado. Esse conceito aponta a importância do aumento da oferta, em um campo de crescimento da demanda.

3.2. Matriz origem destino (O&D)

Para planejar a malha de uma companhia aérea é necessário compreender a distribuição do tráfego. As cidades com maior potencial de tráfego de passageiro e carga são as que mais recebem voos [ABAER 2016].

A matriz Origem e Destino (Origen and Destination of Passanger), demonstra quantos passageiros existem de uma cidade à outra. [IPEA 2017]. Por exemplo, uma companhia que realiza um voo de Salvador (SSA) a Belo Horizonte (CNF) via São Paulo (SAO) provavelmente tem dentro da aeronave passageiros que partem de Salvador não só com destino a São Paulo e Belo Horizonte, mas também a várias outras cidades, como por exemplo, Rio de Janeiro (RIO) ou Porto Alegre (POA). Dessa forma entende-se que os passageiros de um voo não são apenas da cidade de origem e destino. É possível elaborar rotas com diversas combinações de cidades. A Matriz de O&D torna-se estratégica na medida em que demonstra o potencial de tráfego entre pares de cidade.

3.3. Mercado de transporte aéreo no Brasil

O Brasil apresenta fatores de competitividade que se tornam fortes barreiras para novas companhias que desejam entrar no mercado de transporte aéreo. Os altos custos operacionais, no país, exigem das companhias um poder de capital elevado para arcar os gastos de combustível e a manutenção das aeronaves que são atrelados ao dólar.

A infraestrutura de cada aeroporto define a quantidade de voos, os tipos de aeronaves, o número de passageiros e também quais companhias podem atuar em suas rotas. Cada companhia aérea tem um grau de atuação em determinado aeroporto. Pode-se medir o peso dessa atuação, através dos seus acessos. Esses são nominados como gates e slots, que significam respectivamente, portões de embarque de passageiros e o tempo para a chegada e partida das aeronaves no aeroporto.

Esses recursos são limitados, e concedidos pelo governo através de licitações. Dessa forma, os slots e gates tornam-se fortes barreiras à entrada de novas companhias nesse mercado, pois ainda que tenham capital para arcar com os altos custos operacionais, novos concorrentes terão

dificuldades em atender as principais rotas, pois as empresas dominantes já detêm os melhores slots e gates.

Nos últimos anos, a indústria do transporte aéreo foi marcada por uma intensa competição de market share, além de aquisições, parcerias e acordos unilaterais que fortaleceram algumas companhias e até mesmo salvaram outras da falência [ABAER, 2017].

A centralização de mercado é uma característica deste setor, que opera com poucas empresas estabelecendo assim um ajuste adequado de demanda à oferta, com o objetivo de aumentar as taxas de ocupação e reduzir os custos [Laplane e Ferreira 2006].

4. Indicadores de desempenho

O lucro não é o único indicador de desempenho a ser analisado, mesmo sendo o objetivo de qualquer empresa [PACE 2003]. É imprescindível analisar como que as movimentações de operacionais e de receita interferem no resultado da companhia. Para isso, há outros indicadores que permitem maior entendimento da dinâmica do lucro. São estes:

Assento por quilômetro oferecido (ASK - oferta) e passageiro por quilômetro voado (RPK - demanda): A quantidade de serviço ofertada por uma empresa aérea é de complexo dimensionamento, por se tratar de um serviço que envolve assentos disponíveis e distâncias percorridas, já que estes fatores influenciam no custo de cada operação. Considera-se a oferta de uma empresa aérea multiplicando o número de assentos de uma aeronave, as distâncias percorridas, e a frequência que o serviço é ofertado. [Gomes 2014] O levantamento da demanda da companhia segue a mesma lógica, já que o número de passageiros em um voo é proporcional ao valor financeiro do mesmo. [Panzar 1979] Estes dados servem como base para o desenvolvimento de outros indicadores, apresentados abaixo:

- Taxa de ocupação (load fator): é dado pela divisão do quanto foi vendido pelo quanto foi produzido;
- Receita unitária (Yield): é a receita unitária é quanto cada passageiro paga por quilômetro voado. É obtida pela divisão entre a receita total de vendas (RV) e a quantidade de quilômetro voado.
- Rask: É a receita unitária advinda de cada assento.distância oferecido. Obtém-se dividindo a receita operacional (ROL) pela ASK.
- Cask: É o custo de cada assento.quilômetro que a companhia vem a oferecer. Dá se pela divisão do custo operacional (CO) pela quantidade de assentos.quilômetro oferecidos.
- Belf (break even load fator): é a quantidade teórica de passageiros que um voo precisa ter para que ele não apresente prejuízos para a companhia. É obtido através da divisão entre o Cask e Yield.

5. Custos e despesas das companhias aéreas

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil, aproximadamente 65% das despesas das companhias aéreas são fixas. Existem dois tipos de determinantes de custos: operacionais e estruturais. Os determinantes do tipo estruturais estão diretamente ligados as decisões estratégicas primárias da empresa, já os determinantes dos tipos operacionais estão relacionados ao desempenho das empresas. [Rocha 2009].

Além da aquisição e manutenção de aeronaves, as empresas têm diversas outras despesas como: remuneração de funcionários, compras de diversos insumos e pagamento de tarifas aeroportuárias e órgãos de controle de tráfego aéreo, impostos, entre outras. Cada um desses está sujeito a variações, acompanhando a taxa de câmbio, a sazonalidade e o reajuste de preços.

A ANAC padronizou a nomenclatura dos custos, passando, a partir de 2005, a seguir o Plano de Contas elaborado pelo Departamento de Aviação Civil (DAC) através da Portaria Nº 1.134/SSA de 30 de dezembro de 2004, a qual determina que os custos passem a ser agrupados em três grandes grupos: custos diretos, custos indiretos e despesas operacionais. [Wellington 2010].

Segundo dados da ABRAER (2017), no Brasil, a grande desvalorização do real a partir de 2011, especialmente no ano de 2015, quase anulou os ganhos resultantes da queda do valor do petróleo no mercado internacional. Simultaneamente, os demais custos associados ao dólar

(manutenção, arrendamentos, depreciação de itens aeronáuticos, entre outros) causaram um aumento significativo dos gastos operacionais. Isso levou a uma considerável alteração da participação relativa de cada custo.

Tratando-se de gestão de frota; assim como em outros modais, o custo direto do combustível é o que tem maior expressão. Porém, em vista do preço praticado e do alto volume consumido, requer maior atenção no desenvolvimento e acompanhamento de medidas que visam minimizar esse custo.

6. Modelagem Matemática

6.1. Descrição do Problema

Considerando que a eficiência operacional de um sistema de transporte aéreo decorre, essencialmente, do grau de adequação entre o tipo de aeronave ao tipo de ligação oferecida, o presente trabalho estabelece um modelo de seleção de aeronaves a partir de seu grau de conformidade, em vista da redução do consumo de combustível.

O modelo de seleção de aeronaves leva em conta as características físicas e econômicas, a modo de obter uma análise comparativa entre tipos de aeronaves disponíveis na empresa analisada, de forma a identificar as relações entre capacidade e custos conforme a demanda de voos apresentada.

Este módulo foi construído através de um sistema de equações configurado e resolvido como um problema de programação matemática do tipo (Mixed Integer Programming - MIP), em que função-objetivo é minimizar os custos operacionais diretos da utilização de cada aeronave e atender a demanda prevista.

Para a função de Custos, considera-se como principal fator o consumo de combustível de cada modelo. Com relação às características físicas, são analisados a capacidade de transporte de passageiros e cargas de cada tipo de aeronave e a demanda prevista de cada origem e destino.

6.2. Dados de seleção

As variáveis de decisão do modelo são inteiras. Serão analisados dados estatísticos de uma determinada companhia aérea coletados no site da ANAC (2018).

A tabela 1 contém dados sobre as aeronaves disponíveis na empresa.

Qtd	Modelo	Consumo médio de combustível	Velocidade média	Assentos	Peso máximo p/ decolagem
14	A320 neo	2700 L/h	830 km/h	174	79 toneladas
7	A330	7100 L/h	830 km/h	272	242 toneladas
38	ATR 72	800 L/h	500 km/h	70	23 toneladas
10	EMBRAER 190	2200 L/h	830 km/h	106	47,8 toneladas
59	EMBRAER 195	2300 L/h	830 km/h	118	48,8 toneladas

Tabela 1 - Aeronaves disponíveis.

É importante informar que o modelo considera o consumo de combustível para uma carga-paga correspondente a cada voo. Além disso, fatores como altitude, velocidade, temperatura, efeito dos ventos em rota e características operacionais dos aeroportos, também podem influenciar no consumo de combustível. Esses fatores não serão considerados no presente modelo.

5.3. Modelo de alocação de aeronaves

O problema de minimização do consumo de combustível na alocação de aeronaves de uma companhia aérea pode ser considerado como um modelo de programação linear inteira, e foi

desenvolvido o modelo matemático abaixo, que visa solucionar o modelo apresentado. A função objetivo visa minimizar o consumo de combustível, na alocação de cada aeronave para cada voo.

O Modelo segue de acordo com as equações abaixo:

$$\text{minimizar combustível} = \sum_{a=1}^A \sum_{v=1}^V X_{av} * Dist_v * CA_a \quad (1)$$

$$\sum_{a=1}^A X_{av} = 1, \quad \forall v = 1 \dots V \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^V X_{av} * Dist_v * VD_{vd} \leq H * VA_a, \quad \forall a = 1 \dots A; \forall d = 1 \dots D \quad (3)$$

$$\sum Y_{aod} = 1, \quad \forall a = 1 \dots A; \forall d = 1 \dots D \quad (4)$$

$$Y_{aod} + \sum_{v=1}^V X_{av} * DT_{vo} * VD_{vd} = \sum_{v=1}^V X_{av} * OT_{vo} * VD_{vd} + Y_{ao(d+1)} \quad (5)$$

$\forall a = 1 \dots A; \forall d = 1 \dots D; \forall o = 1 \dots O$

$$\sum_{a=1}^A X_{av} * KA_a \geq DV_v, \quad \forall v = 1 \dots V \quad (6)$$

$$x_{av} \in \{0,1\} \quad \forall a = 1 \dots A; \forall v = 1 \dots V \quad (7)$$

$$y_{aod} \in \{0,1\} \quad \forall a = 1 \dots A; \forall v = 1 \dots V \quad (8)$$

Onde:

A : Quantidade de aviões

V : Quantidade dos voos

D : Quantidade de dias

T : Quantidade de trechos

O : Quantidade de aeroportos

$Dist_v$: distância do voo v

$Dist_t$: distância do trecho t

KA_a : Capacidade de passageiros do avião do tipo a

CA_a : Consumo do avião a

VA_a : Velocidade do avião a

VD_d : Quantidade de voos no dia D

VD_{vd} : Matriz binária que informa se o voo v pertence ao dia d com valor 1 e zero, caso contrário

DT_{vo} : Matriz binária que informa se o voo v tem origem no aeroporto o com valor 1 e zero, caso contrário.

DT_{td} : demanda por voos do Trecho t no dia d

DV_v : Demanda do voo v

OT_{vo} : Matriz binária que informa se o voo v tem destino no aeroporto o com valor 1 e zero, caso contrário.

QA : quantidade de tipos de avião

TA_{aqa} : Matriz binária que informa com 1 se o avião A é do tipo QA

MOT_{vo} : Parâmetro que informa se o voo v tem origem no aeroporto O

MDT_{vo} : Parâmetro que informa se o voo v tem destino no aeroporto O

Variáveis de Decisão:

$$X_{av} = \begin{cases} 1, & \text{se o avião } a \text{ atende ao voo } v \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_{aod} \begin{cases} 1, & \text{se o avião "a" inicia no aeroporto "o" as operações do dia "d"} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A função objetivo, expressa pela equação (1), visa minimizar o consumo de combustível na alocação de aeronaves computando, para cada voo, o produto da distância do voo pelo consumo do avião escolhido. As restrições, expressas pela equação (2) garantem que cada voo seja atendido por um único avião.

As restrições apresentadas pela equação (3) garantem que limite de horas operadas por cada aeronave seja respeitado. As restrições expressas pela equação (4) asseguram que cada avião a cada dia deve iniciar sua operação de uma única origem.

As restrições conforme a equação (5) certificam que a quantidade de decolagens deve ser igual a quantidade de pousos, para cada aeronave, a cada dia e a cada aeroporto, levando em consideração a possibilidade de o avião ter iniciado sua operação no aeroporto ($y_{aod} = 1$) ou finalizar o dia nesse aeroporto ($y_{ao(d+1)} = 1$).

As restrições apresentadas pela equação (6) confirmam que para cada voo, só podem ser alocados aviões cuja capacidade seja maior ou igual a demanda do voo.

Por fim o conjunto de restrições expressos pelas equações (7) e (8) definem os domínios das variáveis binárias x e y .

4. Resultados e Discussão

Para a realização dos experimentos computacionais foram levantados dados da ANAC. Através de dados estatísticos disponível no site da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), foi possível coletar informações para o desenvolvimento do modelo. O site disponibiliza dados de todas as companhias aéreas brasileiras mensalmente. Os dados coletados foram do mês de setembro, especificamente de uma determinada companhia para o presente de caso. Assim foi possível estabelecer uma planilha cujo ordenar para cada origem e destino operado pela companhia, o número de decolagens, horas e distância voadas, passageiros transportados, o gasto de combustível e assentos disponíveis. Dessa forma calculou-se uma média de decolagens por dia e replicou-se pelo período de uma semana.

Ao final do tratamento dos dados, foram avaliados 67 aeroportos que compunham 248 trechos e 4691 decolagens, o que tornou a implementação de uma instância contendo todos os dados intratável.

Assim, como estratégia, foram construídas instâncias menores que possibilitassem a validação do modelo e seus resultados.

Primeiramente construiu-se uma instância constituída por apenas 4 aeroportos: Belo Horizonte (Confins), Brasília, Rio de Janeiro (Santos Dumont) e São Paulo (Congonhas). Verificou-se que esses aeroportos formam 6 trechos com um total de 205 decolagens ao longo de uma semana.

A instância 2, por sua vez, possui os mesmos aeroportos da primeira com a inclusão do aeroporto de Salvador. Os cinco aeroportos formam 8 trechos com um total de 252 decolagens semanais. A instância 3 contempla os aeroportos da instância 2 com a inclusão do aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro. Ao todo são 268 decolagens, nos 10 trechos formados por os 6 aeroportos.

A instância 4 é formada pelo acréscimo do aeroporto de Guarulhos, em São Paulo, aos 6 aeroportos que compõe a terceira instância. Com os sete aeroportos existem 17 trechos e 445 voos semanais. O aeroporto de Vitória – ES foi incluído aos aeroportos da quarta instância para formar a instância 5. Com ele, grupo de 8 aeroportos formou 22 trechos com 578 voos semanais.

O modelo matemático foi implementado na linguagem AMPL e o solver CPLEX 11.1.1 (utilizando configurações padrão) foi utilizado para resolvê-lo. Os testes foram realizados em um Intel i7, com 12GB de Memória RAM e utilizando o Windows 10 64 bits como sistema operacional.

Todos os dados foram tabulados em uma planilha eletrônica para facilitar sua manipulação e análise. Para gerar os arquivos de dados, necessários na implementação do

problema, foi construída uma aplicação utilizando a linguagem C++. Essa aplicação extrai os dados da planilha eletrônica e gera, automaticamente, o arquivo “.dat” utilizado pelo CPLEX (conforme Figura 6).

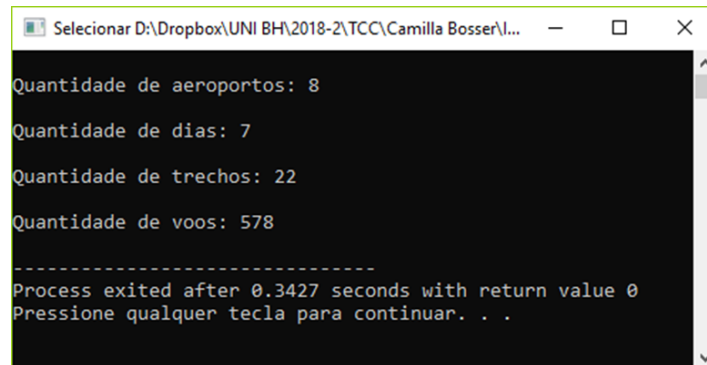


Figura 6 – Tela do aplicativo construído para gerar os arquivos “.dat”

Para cada instância testada, obteve-se a solução inteira ótima e a solução com a formulação relaxada (variáveis X, Y e Z reais e compreendidas no intervalo 0 e 1) e calculou-se a GAP da Relaxação Linear.

A Tabela 2 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Instância				Solução					
Instância	V	O	T	Tempo	FO	Comb.	Aviões	FO Relax	GAP Relax
inst1	205	4	6	219	230122	230121	1	162525	0,29374
inst3	252	5	8	2	333790	333788	2	236368	0,29187
inst4	268	6	10	748	347074	347072	2	245605	0,29236
inst5	445	7	17	1791	585785	585755	30	400761	0,31586
inst6	578	8	22	4047	722905	722874	31	493922	0,31675

Tabela 2 – Síntese dos resultados dos experimentos computacionais.

Fonte: Próprios autores.

É possível notar que o tempo computacional cresce muito rapidamente com o aumento no número de aeroportos e, consequentemente, de trechos e decolagens. É interessante notar que, embora a instância 1 seja razoavelmente menor que a instância 3, seu tempo computacional é consideravelmente maior. Vários testes foram realizados e esse comportamento manteve-se por padrão e os resultados levantados até aqui não são conclusivos para compreender essa anomalia.

Dentro de tempo limite de 7200 segundos (duas horas) o modelo foi capaz de encontrar soluções inteiras ótimas para todas instâncias.

5. Conclusões e trabalhos futuros

Em trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de heurísticas capazes de construir soluções de boa qualidade para problemas maiores que os testados nesse trabalho. Além disso, tais instâncias poderiam ser utilizadas para gerar limitantes ao método exato, o que poderia melhorar a sua convergência.

Outra abordagem seria tratar a questão dos horários dos voos. Entretanto, ao que tudo indica, essa abordagem tornaria o problema ainda mais complexo e intratável do ponto de vista computacional.

Em síntese, conclui-se que as competências da Engenharia de Produção podem ser importantes aliadas na gestão dos processos para realização planejamentos e controles que garantam ganhos de desempenho. Nesse trabalho focamos nas atividades de planejamento e alocação de recursos utilizando uma importante competência que é a capacidade de usar a Pesquisa Operacional como técnica de suporte a decisão. Um novo modelo matemático de programação

linear inteira mista foi proposto a partir de dados reais coletados pelos autores e sua eficácia foi verificada através da implementação e testes computacionais.

Embora os resultados não sejam conclusivos por não ter sido possível aplicá-lo a toda a malha aérea desejada, a experiência foi fundamental para a integração e síntese de várias competências ligadas à Pesquisa Operacional.

Referências

ABAER (2019 - Associação Brasileira das Empresas Aéreas. Disponível em <http://www.agenciaabear.com.br/sem-categoria/o-que-voce-precisa-saber-sobre-malha-aerea/>. Acessado: 2018-07-21.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em <<http://www.anac.gov.br>>. Acessado: 2018-04-02.

Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF, 2008

ANAC. ANAC cria regra de slots para aumentar concorrência em aeroportos saturados. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/imprensa/AnacCriaRegraDeSlots011008.asp>. Acessado: 2018-04-02.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. Anuário Estatístico da Agência Nacional de Aviação Civil vol.I. Disponível em <http://www.anac.gov.br/estatistica/estatisticas1.asp>. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF, 2007. Acessado: 2018-09-18.

ANPET. Transporte aéreo regular no Brasil. Disponível em: <https://portal.tcu.gov.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A8182A24F0A728E014F0AE3B5875727>. Acessado: 2018-10-29.

AZUL LINHAS AEREAS BRASILEIRAS. Disponível em <www.voeazul.com.br> Acessado: 2018-07-20.

Bettini, H. (2007). Um Retrato da Aviação Regional no Brasil. Documento de trabalho N.018 – Acervo Científico do Núcleo de Estudos em Competição e Regulação do Transporte Aéreo (NECTAR). São José dos Campos, SP. Disponível em <www.nectar.ita.br>. Acessado: 2018-04-10.

Neto, C. A. S. C. e Souza, F. H. (2011). Aeroportos no Brasil: investimentos recentes, perspectivas e preocupações. 24p. Nota Técnica (Diretoria de Estudos Setoriais)

Constituição do Marco Regulatório Para o Mercado Brasileiro de Aviação Regional. Nectar/ITA. São José dos Campos, São Paulo, Brazil. Disponível em <<http://www.nectar.ita.br>>. Acessado em: 2018-04-12.

Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), disponível em <[Http://www4.infraero.gov.br/](http://www4.infraero.gov.br/)>. Acessado: 2018-04-02.

Espírito Santo JR., R. A. (2000). Concentração no Transporte Aéreo e os Possíveis Impactos sobre Consumidores, a Sociedade e a Economia. In: Anais do XIV ANPET, PP 239-251, Gramado.

Ferreira, M. J. B.; Laplane, G. (2006). O transporte aéreo no Brasil: panorama geral, avaliação da competitividade e propostas de políticas públicas para o setor. Campinas, Unicamp. 83p. Projeto de Pesquisa CGEE/NEIT-IEUNICAMP, Gestão, Unicamp, Campinas.

Fonseca, P. V.; Gomes, S. B. Configurações de redes de rotas de empresas aéreas – modelos básicos. BNDES Setorial 42, p. 217-244, 2015.

Gomes, S. B. V.; Fonseca, P. V. R. (2014). Análise econômico-operacional do setor de transporte aéreo: indicadores básicos.

Gomes, W. P. e Gualda, N. D. F. (2008). Otimização da Formação de Viagens no Processo de Alocação de Tripulantes e Aeronaves (Crew Pairing Problem). Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza, v. 1, p. 1010-1020.

Gouveia, V. (2015). Planejamento do transporte aéreo. Disponível em: <https://volneygouveia.files.wordpress.com/2016/07/planejamento-no-transporte-ac3a9reo.pdf>. Acessado: 2018-10-29.

Guimarães, M. M. e Junior, J. J. C. (2016). A utilização da pesquisa operacional como ferramenta organizacional na otimização da alocação de recursos e gestão de custos. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa, PB.

Hane, C., Barnhart, C., Johnson E., Marsten, R., Nemhauser, G. e Sigismondi, G. (1994). A fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program, Technical report, Georgia Institute of Technology, School of Industrial and System Engineering. Report series 92-04.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. (2018) Disponível em: http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatorio_pesquisa/20170109_rp_construcao-da-matriz-origem-destino.pdf. Acessado: 2018-11-06.

Klabjan, D. (2004). Large-scale models in the airline industry, in G. Desaulniers, J. Desrochers, M. M. Solomon, editors, Column Generation, Kluwer Academic Publishers.

Moreira, D. A. (2011) Pesquisa operacional: curso introdutório. São Paulo: Thomson Learning, 2007, p. 356.

Moura, G. B. (1992). Transporte Aéreo e Responsabilidade Civil. São Paulo, Aduaneiras.

Oliveira, H. F. M. (2017). Desenvolvimento de um modelo de otimização para planejamento de rotas de companhias aéreas. Tese. Universidade de Lisboa. Lisboa.

Pace, E. S. U., Basso, L. F. C.; Silva, M. A. (2003). Indicadores de desempenho como direcionadores de valor. Revista de Administração Contemporânea, v. 7, n. 1, p. 37-65.

Panzar, J. C. (1979). Equilibrium and welfare in unregulated airline markets. The American Economic Review, v. 69, n. 2, p. 92-95.

Rabetanety, A., J. Calmet e C. Schoen. (2006) Airline Schedule Planning Integrated Flight Schedule Design and Product Line Design. Tese. Universität Karlsruhe. Karlsruhe.

Ragazzo, C. A. E. (2006). O Processo de Flexibilização e as Fusões e os Acordos de Cooperação no Mercado de Transporte Aéreo de Passageiros

Rodrigues, P. R. A. (2007). Introdução aos Sistemas de Transportes no Brasil e à Logística Internacional. 4ed. São Paulo, Aduaneiras.