

Um modelo integrado de simulação-otimização para a avaliação de um novo negócio de aeronaves de propriedade compartilhada

[A simulation-optimization model for the problem of evaluating a new fractional ownership jets operation]

Juliana da Serra Costa Lopes, Claudio Barbieri da Cunha*

Universidade de São Paulo (USP), Brazil, Universidade de São Paulo (USP), Brazil

Submitted 29 Oct 2011; received in revised form 15 Dec 2011; accepted 26 Jan 2012

Resumo

Este artigo descreve um modelo integrado de simulação-otimização para auxiliar na avaliação de uma nova operação de jatos de propriedade compartilhada, que surge na fase de planejamento de um novo negócio, quando é necessário avaliar localizações alternativas para as bases onde ficam os jatos (quantas e onde), assim como estimar a mínima frota requerida e a quantidade de viagens vazias ("deadhead") que não geram receita. O problema de determinação da frota ótima e alocação das aeronaves aos voos é modelado como um problema de fluxo em rede espaço-tempo de mínimo custo, com base em demandas diárias de voos geradas a partir de simulação de Monte Carlo. O modelo foi implementado em ambiente de planilha Excel com automatização de todos dos procedimentos de simulação e de montagem e resolução do modelo de otimização, de tal modo que os dados possam ser alimentados, atualizados e modificados, e os modelos processados por qualquer pessoa sem conhecimento ou domínio de pesquisa operacional.

Palavras-Chave: aeronaves; programação inteira e fluxos em rede; monte carlo; propriedade compartilhada.

Abstract

In this paper we describe a simulation-optimization model to help evaluate the feasibility of a new fractional ownership jets operation. This problem arises in the planning phase a new business to be launched, when it is necessary to evaluate alternative base location for the jets (how many and where) as well as to estimate the minimum required fleet size and the amount of deadhead (i.e. empty) trips that do not generate revenue. The problem of determining the fleet requirements, as well as allocation of jets to minimize the empty flights are modeled as a space-time minimum cost network flow model legs based on daily flight demands generated by Monte Carlo simulation. Our model was implemented in Excel spreadsheet with automation of all procedures related to the simulation and to building and solving the optimization model, in such a way that data can be easily inputted, updated and modified, and the models run in an easy and straightforward way by anyone with no required skills in operations research

Key words: jets; network flow; monte carlo; fractional ownership.

* Corresponding Author. Email: cbcunha@usp.br.

Recommended Citation

Lopes, J. S. C. and Cunha, C. B. (2012) Um modelo integrado de simulação-otimização para a avaliação de um novo negócio de aeronaves de propriedade compartilhada. Journal of Transport Literature, vol. 6, n. 4, pp. 8-37.

■ JTL|RELIT is a fully electronic, peer-reviewed, open access, international journal focused on emerging transport markets and published by BPTS - Brazilian Transport Planning Society. Website www.transport-literature.org. ISSN 2238-1031.

This paper is downloadable at www.transport-literature.org/open-access.

1. Introdução

Dentre os diversos meios de transporte, o aéreo é o que oferece maior velocidade para o deslocamento de passageiros e cargas. Desde a década de 1950, a popularidade da aviação só aumentou e esta passou a ser a principal opção para percorrer distâncias médias e grandes. O surgimento de inúmeras empresas aéreas e a demanda de passageiros provocou um crescimento desajustado da aviação comercial e na aviação geral criaram-se novas opções para suprir as deficiências da oferta imprópria do serviço.

Pessoas cujos trabalhos requerem viagens constantes, que buscam alternativas para aeroportos lotados, que querem ir para cidades que não são atendidas pela aviação comercial, que desejam decidir os horários de suas viagens ou que procuram privacidade podem optar por viajar em aeronaves executivas. Quando se trata de viagens em aeronaves executivas, há diversas opções de serviços, principalmente nos EUA. Uma das opções mais simples é o aluguel de aeronaves: o passageiro contrata o serviço de uma empresa que faz fretamento de aeronaves, ou charter, escolhe o tipo de aeronave em que quer voar, determina seu local de destino, realiza seu voo e paga pelo serviço em função do tempo voado. Entretanto, o passageiro não arca somente com os custos referentes ao voo, mas também com os custos do retorno da aeronave vazia ao seu local de origem após o voo (Thurber, 2010). Outra opção bastante difundida nos EUA é a dos “*Jet cards*”, que funcionam como um cartão de débito. O cliente compra uma quantia de horas e quando solicita um voo, as horas ocupadas na aeronave são descontadas do total de horas do cartão (Preston, 2009). Ao contrário do que acontece com as aeronaves fretadas, o cliente paga apenas pelo tempo de voo, e os custos de levar a aeronave de volta ao seu local de origem são responsabilidade da empresa operadora do serviço.

Quando há a necessidade de realizar muitos voos, há a opção de comprar uma aeronave. O proprietário da aeronave pode assumir pessoalmente a administração da aeronave e todos os seus requisitos como autorizações, taxas, seguros, manutenções, tripulação e afins; ou o proprietário pode contratar uma empresa para gerenciar sua aeronave e garantir que esteja à disposição sempre que desejado. É uma opção que, ao contrário do fretamento e do “*Jet*

card”, exige investimento elevado para a aquisição de aeronave, além dos custos de operação e manutenção, que são arcados pelo proprietário (Thurber, 2010).

Todavia, existe uma opção intermediária entre possuir uma aeronave e usar um fretamento ou “*Jet card*”. Em 1986 uma companhia norte-americana de charter de jatos denominada NetJets criou um novo serviço para seus clientes. O modelo de negócios conhecido como propriedade compartilhada (do inglês “*fractional aircraft ownership*”), visa a atender a pessoas que querem desfrutar dos benefícios e conforto de uma aeronave particular, reduzindo os ônus da aquisição e manutenção da mesma. Dessa maneira, o cliente adere à propriedade compartilhada com a garantia de ter uma aeronave à sua disposição quando necessário, com tripulação preparada, tanque de combustível abastecido, manutenção em ordem, autorização de voo e demais providências necessárias para voar. Mais especificamente, o usuário faz um investimento menor na aquisição de uma cota de propriedade de uma dada aeronave, de certo tipo e padrão, arcando com uma mensalidade para cobrir custos fixos. A cada utilização da aeronave incorre um valor destinado a cobrir os custos variáveis de utilização da mesma, baseado nas horas voadas. Quando o cliente deseja se desligar do serviço pode simplesmente vender sua cota da aeronave (Butler, 2008).

O sucesso da operação de um negócio de aeronaves compartilhadas depende, dentre outros fatores, da estrutura do serviço e das decisões tomadas durante a fase de planejamento, durante a qual não se possuem dados da operação. Este trabalho versa sobre análises que devem ser feitas no âmbito mais geral do planejamento de um negócio de jatos compartilhados. O desenvolvimento da ferramenta objetiva fornecer informações necessárias para auxiliar na tomada de decisões estratégicas que envolvem a escolha da frota e, dessa forma, proporcionar ao analista uma visão geral da complexa operação.

Trata-se de um tema novo, uma vez que não foram encontradas na literatura pesquisas que tratem do planejamento estratégico de uma empresa que gerencia aeronaves compartilhadas.

É proposta uma metodologia composta de duas fases, que envolvem a simulação das demandas diárias de solicitações de voos pelo método de Monte Carlo, para contornar as dificuldades impostas pela imprevisibilidade da demanda, e a otimização da alocação de aeronaves para o período simulado, através da resolução de um problema de fluxo em rede de custo mínimo a fim de determinar de quais bases devem sair as aeronaves para atender a cada

voos. Dessa forma, tem-se informações sobre o número de aeronaves utilizadas em cada base, os voos ociosos de reposicionamento e consegue-se determinar o impacto da escolha dos locais de base no tamanho da frota e no reposicionamento de aeronaves.

Mediante os resultados obtidos pela ferramenta, é possível a avaliação do desempenho do modelo de negócio da empresa em sua fase inicial de planejamento estratégico e tático e o estudo de configurações e políticas operacionais antes de sua implantação.

Este artigo está organizado em seis seções. A seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica de problemas semelhantes ao abordado e fontes sobre abordagem conjunta de modelos que envolvam simulação e otimização. Na seção 3 é detalhado o problema de jatos compartilhados, com a caracterização das variáveis, das restrições e dos parâmetros adotados. Na sequência, é apresentada a metodologia de solução proposta. A seção 4 relata a construção da ferramenta no ambiente de planilha eletrônica. São apresentados os dados de entrada necessários e sua organização nas planilhas, além da interface em VBA que foi desenvolvida para automatizar a ferramenta e para assegurar seu correto funcionamento. A seção 5 contém testes de desempenho da ferramenta, com algumas análises que podem ser feitas com os resultados advindos da ferramenta, que não serão detalhados, tais como os impactos provocados pela escolha das bases e modificações na frota. Finalmente, a seção 6 apresenta conclusões e recomendações para a continuidade da pesquisa.

2. Revisão Bibliográfica

Um dos primeiros trabalhos sobre jatos compartilhados foi o de Keskinocak e Tayur (1998). A partir de um problema real de aeronaves de propriedade compartilhada, os autores desenvolveram uma solução para programar os voos das aeronaves de maneira que os custos operacionais e as multas aplicadas em caso de não atendimento dos clientes fossem minimizados. Foram consideradas três metodologias de solução. Um caso de pequenas dimensões (até 20 aeronaves e 50 viagens), modelado como um problema de fluxo em rede de mínimo custo que obteve solução ótima e foi resolvido utilizando-se o pacote de otimização CPLEX. Para os outros dois casos, maiores que o anterior e que, devido ao grande número de variáveis, não poderiam mais ser resolvidos pelo CPLEX, foram utilizadas heurísticas que proporcionaram soluções sub-ótimas, mas com tempos de processamento reduzidos.

Entretanto, o trabalho de Keskinocak e Tayur (1998) abrangia apenas operação com frota homogênea e, com base nisso, Martin *et al.* (2003) complementaram o problema operacional de alocação de aeronaves com a adoção de frota heterogênea e inclusão das restrições de tripulação. O sistema de solução composto por dois softwares aloca as aeronaves aos voos por um modelo de fluxo em rede resolvido por CPLEX (software *Flight Ops*) e essa programação dos jatos é utilizada como dado de entrada para distribuir a tripulação dentre os voos (software *Schedule Miser*). Essa solução encontrada não é ótima, pois trata a programação das aeronaves e a alocação da tripulação separadamente. Entretanto, é uma solução que obedece a todas as restrições da FAA (sigla de *Federal Aviation Administration*), agência que regula a aviação civil nos EUA, e é aceitável considerando-se as características da operação.

Hicks *et al.* (2005) relatam como a companhia de jatos compartilhados Bombardier Flexjet organizou seu sistema de tomada de decisões para otimizar sua operação. Com o objetivo de maximizar o uso das aeronaves, da tripulação e das instalações físicas, foram integrados os sistemas previamente independentes de alocação de tripulação, alocação de aeronaves e programação de viagens. As variáveis e restrições foram divididas em subproblemas e o método de geração de colunas simplificou tais problemas, reduzindo seu tamanho para permitir a solução integrada. Esse sistema integrado desenvolvido por Hicks *et al.* (2005) proporcionou para a empresa economia de cerca de 27 milhões de dólares por ano e a utilização das aeronaves aumentou em 10%.

Stojkovic *et al.* (2002) abordaram o problema de alocação de aeronaves também com foco na fase operacional. Foi proposto um modelo baseado em fluxo em rede de mínimo custo para contornar imprevistos diários durante a operação alterando somente os horários de partida e de chegada e a duração dos voos, sem afetar a alocação das aeronaves e os itinerários da tripulação. A formulação buscou minimizar o custo total, obedecendo a restrições temporais de disponibilidade das aeronaves e de tripulação. Porém, assim como todos citados anteriormente, o trabalho de Stojkovic *et al.* (2002) tratou o problema com ênfase na fase operacional, onde as bases e o dimensionamento da frota já haviam sido determinados, ao contrário do que acontece com o problema abordado neste trabalho.

Espinoza *et al.* (2008) apresentam uma abordagem de fluxo em rede de mínimo custo para realizar a programação diária de jatos de uma empresa que propunha um serviço de táxi aéreo. Conseguiram, através de relaxação linear, reduzir o problema e resolvê-lo para poucas

aeronaves e número limitado de solicitações. Porém, para a situação da operação real da empresa, foi necessário o uso de uma heurística de busca local na vizinhança para obter soluções não ótimas, mas de qualidade aceitável para a operação. Os autores dedicaram-se ao problema de taxi aéreo, que apresenta uma diferença básica em relação ao problema de propriedade compartilhada: no taxi aéreo o sucesso da otimização consiste em agregar solicitações de viagens para serem atendidas por um mesmo voo, enquanto na propriedade compartilhada os clientes não dividem uma aeronave durante um voo. Entretanto, apesar das distinções no ponto de vista operacional e, conseqüentemente, nas restrições da modelagem dos problemas, a abordagem utilizada pelos autores de modelagem de fluxo em rede também é adequada para o caso de propriedade compartilhada, como pôde ser visto nos trabalhos citados anteriormente.

Yao *et al.* (2007) fazem uma extensa revisão bibliográfica sobre alocação de jatos compartilhados e apresentam com detalhes as características do problema. Propõem uma metodologia com geração de colunas para otimizar a operação de um período de 3 dias. São feitas também análises do ponto vista econômico para avaliar o impacto que alterações operacionais e táticas como programar ou não a manutenção das aeronaves e variação da demanda têm na operação diária do serviço.

Por outro lado, diversos autores utilizaram a modelagem como fluxo em rede para solucionar outros problemas que envolvem alocação de veículos. Silva (2001) trabalhou com modelos de fluxo em rede para tratar o problema de programação de veículos no sistema de transporte coletivo por ônibus. Fink e Reinert (2006) abordaram um problema para otimizar a utilização da frota de uma locadora de carros alemã, cuja demanda, assim como no caso de aeronaves compartilhadas, é imprevisível e varia diariamente. O problema foi modelado e resolvido como fluxo em rede de mínimo custo com objetivo de maximizar os lucros, minimizando os custos variáveis da operação.

Cortes e Cunha (2010) modelaram o problema de programação de entrega de concreto produzido em centrais dosadoras como um problema de fluxo em rede. O modelo decide a partir de qual central cada cliente deve ser atendido e o horário de carregamento de cada veículo nessa central para maximizar a receita total. O modelo foi implementado em ambiente de planilha eletrônica como parte de um sistema de apoio à decisão.

Em síntese, não foram encontrados na literatura pesquisas que se concentrem no planejamento estratégico de uma empresa que gerencia aeronaves compartilhadas, que é o propósito desta pesquisa. Os trabalhos encontrados na literatura sobre jatos compartilhados abordam o assunto com foco sempre em otimizar a programação das aeronaves para uma operação existente; nenhuma pesquisa trata do tema com enfoque no planejamento estratégico. As informações de quantas bases devem ser utilizadas, onde localizar as bases, em que região operar e qual tamanho da frota são conhecidas previamente ao estudo e não há discussão sobre o impacto de como essas decisões afetam a futura operação do serviço.

3. Caracterização e Modelagem do Problema de Alocação de Aeronaves Compartilhadas

O problema objeto da presente pesquisa é baseado na necessidade real de uma empresa que fabrica e comercializa jatos compartilhados no tocante à análise da viabilidade de novos negócios. Mais especificamente, o sucesso de uma nova operação pode ser avaliada a partir da frota necessária, bem como dos voos vazios para reposicionamento de aeronaves.

A falta de dados é a maior dificuldade para se avaliar alternativas de planejamento a longo prazo. Para contornar esse empecilho, nesta pesquisa adotou-se a metodologia de integrar simulação e otimização. O modelo de simulação gera dados representativos da demanda por voos e o modelo de otimização busca a solução ótima para aquele determinado cenário.

Dessa forma, propõe-se uma ferramenta que permite estimar a alocação de aeronaves para uma dada demanda de voos diários, dimensionar a frota e o reposicionamento de aeronaves, em nível estratégico, de análise de viabilidade de negócios em um horizonte de planejamento de meses e anos, não servindo, portanto, para decisões de cunho mais operacional.

3.1 Caracterização das modalidades de operação de aeronaves compartilhadas

Nesta seção são descritas as três modalidades de operação de aeronaves compartilhadas consideradas: um que opera com frota própria homogênea, outro que opera com frota própria heterogênea e um terceiro modelo que utiliza frota própria homogênea com opção de aluguel de aeronaves de terceiros para atender a determinados voos.

Na modalidade de operação com frota própria homogênea, como o nome sugere, são consideradas que as aeronaves são idênticas em termos de desempenho e de capacidade das aeronaves. Ou seja, as aeronaves desenvolvem as mesmas velocidades e possuem autonomia de voo equivalentes e conseguem transportar a mesma quantidade de passageiros. Outra característica do modelo é que o operador é detentor de toda a frota, ou seja, todos os custos de manutenção, seguro e operação são de responsabilidade da empresa operadora e não há a possibilidade de alugar aeronaves externas.

Para a modalidade com frota própria heterogênea assumiu-se que a operação pode contar com dois tipos de aeronaves, distintas por capacidade e desempenho. Cada cliente adquire sua cota de acordo com a aeronave desejada e, ao solicitar um voo, deve ser atendido por uma aeronave pertencente à categoria associada ou superior. Assim como no caso de frota homogênea, o operador é responsável por toda a frota, que é própria, e não há opção de alugar aeronaves de terceiros.

A terceira modalidade de operação trabalha com frota homogênea, porém permite que sejam utilizadas aeronaves alugadas para atender a determinados voos. O operador possui uma frota própria, de aeronaves iguais, mas caso seja conveniente, pode alugar aeronave de outra empresa para atender a algum voo.

Vale ressaltar que, embora existam outras modalidades de operação, elas podem ser consideradas extensões das alternativas apresentadas anteriormente. Modalidades como frota heterogênea com mais de dois tipos de aeronaves ou de frota própria heterogênea com opção de aluguel são menos comuns mas podem ser considerados na modelagem proposta sem dificuldades.

As três modalidades de operação consideram também as seguintes premissas:

- Todas as viagens solicitadas devem ser atendidas, ou seja, nenhum cliente que requisite um voo deve ter sua viagem não atendida por falta de aeronave disponível;
- Um cliente não compartilha a aeronave com o outro cliente durante uma viagem; caso dois clientes desejem realizar voos com origem e destino idênticos, no mesmo dia e no mesmo horário, os mesmos não serão alocados na mesma aeronave;
- Para o caso de frota heterogênea, o cliente só pode ser atendido por uma aeronave diferente da solicitada se houver a opção de utilizar uma aeronave de categoria superior,

sem prejuízos ao conforto do passageiro e ao horário da viagem. Não é permitido o uso de uma aeronave de categoria inferior à solicitada;

- Os custos de reposicionamento de aeronaves são do operador; caso aeronaves precisem fazer voos de reposicionamento, sem clientes, os custos diretos são incluídos no cômputo do custo total, sendo, portanto, uma parcela que compõe a função objetivo a ser minimizada;
- A operação é feita somente em uma região pré-determinada. Todas as rotas possíveis são previamente determinadas pelo operador em termos dos locais de origem e destino. A princípio, isso é um fato importante para a simulação a partir da qual vão ser gerados os voos, pois no simulador as rotas a serem cumpridas são sorteadas aleatoriamente dentre uma lista de voos pré-definida;
- Todos os aeroportos são capacitados para receber qualquer aeronave da frota, ou seja, não há restrição de pouso em nenhum aeroporto da área de operação para qualquer tipo de aeronave;
- As bases das aeronaves são os locais que servem de garagem e também onde são realizadas as operações de manutenção. Os aeroportos que servirão de base são pré-definidos pelo usuário para cada cenário analisado. São conhecidos a quantidade de bases, a localização de cada base e o respectivo número de aeronaves disponíveis em cada base;
- Todas as aeronaves devem retornar à sua respectiva base de origem ao final do dia de operação para a realização de manutenção, e também a fim de atender às normas de descanso de tripulação;
- A modelagem considera um “*turn around time*” (tempo necessário para preparar a aeronave para o próximo voo, incluindo procedimentos que englobam a troca de tripulação, quando for o caso, e o abastecimento da aeronave) que pode variar de 15 min a 30 min;
- O tempo de viagem de cada rota é calculado em função da distância voada, com base no desempenho da aeronave padrão no caso de frota homogênea e das aeronaves que compõem a frota heterogênea.

Algumas premissas expostas anteriormente são simplificadoras, tendo em vista a complexidade do problema, a finalidade da ferramenta e o grau de incerteza nos dados de

entrada de uma operação que ainda não iniciou. Na prática, algumas restrições podem não ser válidas, mas são razoáveis, dentro da necessidade de simplificação para a modelagem. Assim, ressalvas devem ser feitas na consideração das premissas. Por exemplo, a imposição do atendimento de todas as viagens, é um recurso para determinar qual é a frota realmente necessária para a operação e, na prática, é uma restrição que pode não existir.

Da mesma forma, o custo total de reposicionamento das aeronaves é importante para avaliar a viabilidade do negócio e, portanto, a adoção da premissa de que o operador arca com tais custos é coerente com o objetivo final da ferramenta. Além disso, assumir que não há restrição de pouso em nenhum dos aeroportos da área de operação também é uma medida simplificadora, tendo em vista que, principalmente nos aeroportos de grande movimentação, há restrição de horários para operação de jatos executivos e muitas vezes não há “slots” nem hangares disponíveis para novas operações.

Estabelecidas as modalidades de operação e as premissas, parte-se para a modelagem dos problemas para um período de planejamento.

3.2 Geração dos voos diários através de Simulação de Monte Carlo

A imprevisibilidade da demanda pelo serviço de jatos compartilhados é um dos maiores fatores de incerteza considerados na fase inicial de planejamento das operações e de análise de viabilidade do negócio. Durante a fase de planejamento estratégico, o objetivo principal é o de determinar a necessidade ótima da utilização da frota de aeronaves e da localização bases, além de analisar o modelo de operação mais adequado à empresa.

Antes de implantar o negócio, o operador dispõe de apenas dados gerais sobre o mercado, tais como que rotas pretende operar, mas sem conhecimento da demanda real de voos. A simulação apresenta-se como uma ferramenta para contornar essa imprevisibilidade da demanda e manter o foco no dimensionamento ótimo da frota de aeronaves.

O método de simulação de Monte Carlo data de 1949, quando Nicholas Metropolis e Stanislaw Ulam escreveram sobre a maneira utilizada para contornar a dificuldade de lidar com equações de partículas nucleares. De acordo com Metropolis e Ulam (1949), ao invés de trabalhar com complexas equações da teoria cinética de gases, integrais múltiplas e derivações laplacianas, foi utilizada uma abordagem estatística para simular o comportamento das

partículas. Com parâmetros que refletem as distribuições iniciais dos elementos, produz-se um novo conjunto de dados através da geração de valores aleatórios com distribuição probabilística igual à dos dados iniciais. Com esses valores, os parâmetros determinísticos (objetivos da análise) são obtidos algebricamente por equações mais simples.

Segundo os autores, o nome do método foi uma homenagem à cidade de Monte Carlo, famosa por seu cassino, cujos jogos de sorte (tais como roleta e dados) possuem comportamento aleatório. Quando se jogam dados, são conhecidas as faixas de resultados possíveis e suas probabilidades de ocorrência, assim como as faixas de valores possíveis para as variáveis determinísticas da simulação, porém, não é sabido o valor específico para cada jogada ou o valor que cada variável vai adotar em determinado período de tempo. Para maiores detalhes sobre a simulação de Monte Carlo sugere-se, por exemplo, a obra de Mooney (1997).

No problema abordado nesta pesquisa, as solicitações dos clientes têm comportamento aleatório, assim como os jogos dos cassinos. Não é possível prever de antemão que clientes solicitarão voos dia-a-dia, quais rotas serão escolhidas (ou seja, qual o aeroporto de origem e qual o de destino de cada voo) e tampouco os horários de partida dos voos. Nesse contexto, foi estruturado um esquema de simulação baseado em Simulação de Monte Carlo para representar o comportamento das solicitações dos clientes durante a operação de uma empresa de jatos compartilhados. O objetivo da simulação é gerar uma agenda diária de voos a serem atendidos pelas aeronaves disponíveis que reproduza a operação da empresa. Assim, os parâmetros de saída da simulação devem ser o número de voos por dia, os horários de partida dos voos, os aeroportos de origem e destino de cada voo e o tipo de aeronave solicitada.

O primeiro passo consiste em estruturar uma base de dados para servir como dados de entrada da simulação. Neste caso, as informações necessárias consistem das rotas operadas, da probabilidade de ocorrência de cada rota, da localização dos aeroportos que podem servir de base e também de dados de desempenho das aeronaves que fazem parte da frota. A simulação permite obter a tabela de voos de cada dia do horizonte de planejamento. A definição de quantos dias serão simulados depende da análise que será feita. Períodos muito curtos não conseguem proporcionar resultados que representem significativamente a operação e, portanto, as conclusões sobre a localização de bases e números de aeronaves não são representativas.

Além da quantidade de dias do período simulado, cabe ao usuário informar na ferramenta de simulação a quantidade máxima e mínima de voos diários e a probabilidade de solicitação de cada tipo de aeronave, dados que representam a variabilidade diária da demanda. Assim, um dia do período simulado pode ter quantidades diferentes de voos solicitados do que o dia anterior. Na simulação, uma solicitação de voo por um cliente é caracterizada por 4 parâmetros: local de origem, horário de partida, local de destino e tipo de aeronave. Os demais parâmetros do voo (tempo de voo e distância voada) são determinados em função desses parâmetros iniciais.

Considerando-se a etapa de planejamento e a indisponibilidade de dados específicos da operação do negócio, adotou-se como premissa que as solicitações dos voos comportam-se conforme distribuição uniforme e, visando o dimensionamento da frota, a quantidade de voos é representativa do horário de pico da operação. Assim, o processo de geração dos voos para cada dia inicia-se com o sorteio de um número aleatório. Tal número, associado aos valores de máximo e mínimo de voos definidos previamente, determina a quantidade de voos do dia. Em seguida, para cada um dos voos daquele dia, sorteia-se um número aleatório para definir o horário de partida do voo e outro para escolher a rota dentre uma matriz de possíveis rotas com suas respectivas probabilidades de ocorrerem. Finalmente, sorteia-se o último número aleatório para o tipo de aeronave, cuja escolha é independente da rota. Conhecidos tais atributos, calcula-se a distância do voo. Cada rota é definida por um aeroporto de origem e de destino, com coordenadas conhecidas. Através de uma fórmula que leva em consideração correções em função da curvatura da Terra, calcula-se a distância de voo entre os dois aeroportos. O tempo de voo é determinado em função da distância: relaciona-se o desempenho da aeronave com a distância voada.

Esses procedimentos são repetidos para cada voo de cada dia, para todos os dias do período de simulação estipulado pelo usuário no início do processo. Ao final desse processo de geração aleatória de voos diários tem-se uma lista representativa de solicitações de viagens de clientes potenciais do negócio. Cada voo tem horário de saída, local de partida e destino determinados. A lista diária de voos é elaborada para o período determinado pelo usuário e, como os dados de entrada da simulação buscam representar características do negócio real, tenta-se reproduzir a demanda para o período. A partir desse ponto, tem-se dados suficientes para a

construção da rede diária e para otimizar a alocação da frota de aeronaves para cada dia do horizonte de planejamento.

Vale ressaltar que o procedimento de geração de voos por simulação de Monte Carlo é genérico o suficiente para acomodar qualquer nível de detalhamento da demanda, tais como variações por tipo de dia da semana, por semana do mês, por mês e por período do ano (férias, festas, etc.) sem perda de generalidade do modelo. Adicionalmente, é possível considerar outras distribuições de probabilidade que não a uniforme para a geração dos horários de partida dos voos, de forma a representar a ocorrência de períodos com maior demanda de voos, em situações em que são conhecidas informações suficientes para permitir esse tipo de representação mais acurada das solicitações de viagens, o que normalmente não ocorre nessa fase inicial de avaliação de viabilidade de um novo negócio por um fabricante de aeronaves.

3.3 Modelo de fluxo em rede para otimização da utilização das aeronaves

Conforme visto na seção anterior, ao final do processo de simulação das solicitações de voos para cada dia de operação dentro de um horizonte de planejamento, tem-se como dados de entrada para a otimização uma lista de voos de um dia originada na simulação. Os voos têm rotas com origem e destino conhecidos, horário de partida, tempo de viagem e tipo de aeronave. Todos os voos devem obrigatoriamente ser realizados e as aeronaves podem ser deslocadas de qualquer uma das bases, contanto que retornem para a mesma base no final do dia de operação.

Para o modelo matemático, as bases de operação devem ser definidas antes da otimização. Também deve ser pré-definida a frota de aeronaves alocada em cada base de forma que, no início da otimização, sejam conhecidos quantas aeronaves (e de quais aeroportos) estão disponíveis para atender à lista de voos. Deve-se dimensionar a quantidade de aeronaves para que o número de aeronaves em cada base seja suficientemente grande para assegurar que sejam utilizadas tantas aeronaves quanto necessário em cada dia de modo a obter a solução de mínimo custo. Exceção deve ser feita no caso de alguma base possuir alguma limitação de tamanho que restrinja a quantidade de aeronaves disponíveis para operação.

3.3.1 Modelo com frota própria homogênea

Seja $G = (N, A)$ uma rede espaço-tempo composta por um conjunto N de nós e A de arcos. O conjunto dos $|N|$ nós é formado pelos aeroportos de origem e destino de cada voo sorteado para aquele dia e pelas bases. Cada nó corresponde a um local (de partida ou chegada) em um determinado horário, de forma que dois voos que tenham os mesmos locais de origem e destino e no mesmo horário, embora improváveis, são representados por nós distintos com a finalidade de obedecer à imposição de que dois clientes não dividam a mesma aeronave durante um voo, ou seja, dois voos devem ser realizados.

Os aeroportos que são origem e destino de voos fazem parte do subconjunto de *Nós_intermediários*, enquanto as bases formam o subconjunto *Nós_base*. Cada voo gerado na simulação é representado por um arco que conecta um nó de origem ao seu correspondente nó de destino em determinado horário. Os voos são classificados em ordem crescente pelo seu horário de partida e recebem uma numeração que vai de $v = 1$ a NV voos para aquele dia.

A numeração dos nós está relacionada com a numeração (v) dos voos: o de origem recebe numeração ($2v$) e o de destino ($2v + 1$). Dessa forma, é possível identificar facilmente cada voo durante a otimização. Sabe-se, por exemplo, que o voo 1 corresponde a um arco que liga o nó 2 ao nó 3 ou que o nó 10 é origem do voo 5, cujo nó correspondente à extremidade de destino é o 11.

Na Figura 1 tem-se $NV = 5$ voos, numerados de $v = 1, 2, \dots, 5$ e indicados, respectivamente, pelos arcos (2,3), (4,5), (6,7), (8,9) e (10,11) que são denominados *Arco_voo*. Esses voos são gerados no modelo de simulação e ordenados cronologicamente por horário de partida dos voos para cada dia. Cada *Arco_voo* de um voo v conecta um nó de origem ($2v$) ao nó de destino da viagem, ($2v+1$). Todos estes arcos devem ser voados por somente uma aeronave e obedecer aos horários estipulados na simulação: horário de partida, tempo de viagem e horário de chegada.

Cada base de onde partem as aeronaves e para onde devem retornar no final do dia de operação é representada por dois nós. Antes da otimização, são conhecidas a quantidade de bases (b), a localização e a frota de aeronaves de cada base (f_b). A cada uma das B bases (B_1 a B_b) são associados dois nós: o nó ($b00$) representa a base de partida das aeronaves (nó fonte

ou “*source*”) e o outro (*b01*) representa o destino das aeronaves quando voltam para a respectiva base. Seguindo essa forma de numeração, a base B_1 é representada pelos nós 100 e 101; a B_2 por 200 e 201 e assim por diante.

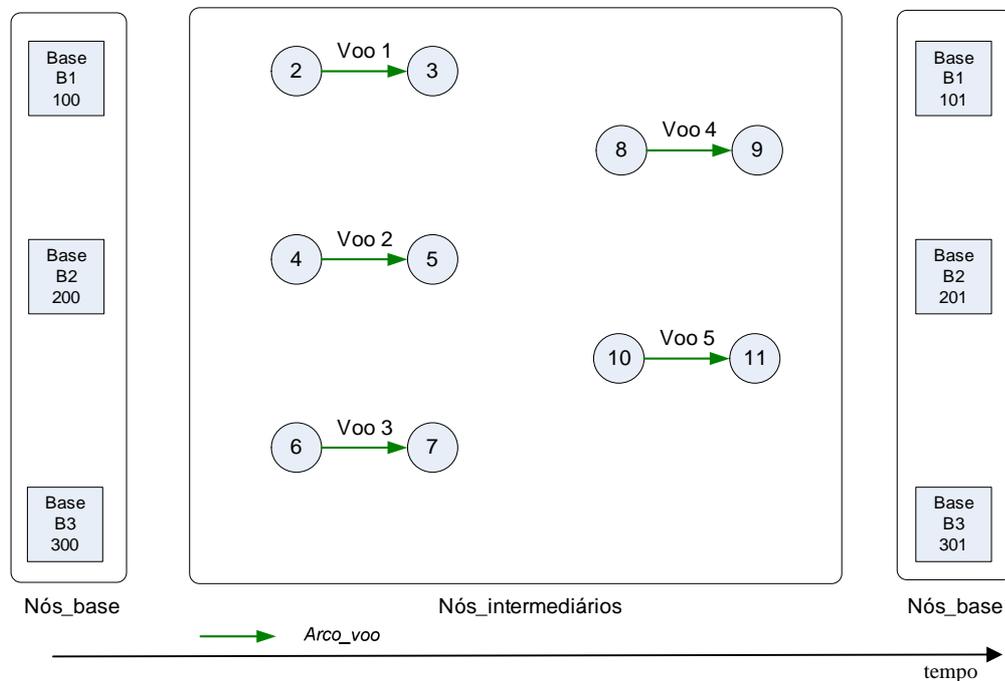


Figura 1 - Rede homogênea com nós, bases e voos

O próximo passo para a estruturação da rede é a inserção dos arcos que conectam os nós. Todos os arcos têm como atributos: nós de origem e destino, horário de partida, tempo de viagem, horário de chegada e custo. O conjunto de arcos é composto por 4 tipos de arcos: *Arco_voo*, *Arco_base_ida*, *Arco_base_volta* e *Arco_reposicionamento*.

Os arcos do conjunto *Arco_voo*, descritos anteriormente, representam os voos da lista gerada na fase de simulação. Tais arcos conectam os nós de origem ($2v$) e destino ($2v+1$) de cada voo. São criados NV *Arco_voo*, ou seja, tantos arcos quanto o número de voos da lista originada na simulação.

Os arcos do conjunto *Arco_base*, por sua vez, são subdivididos em 2 tipos: *Arco_base_ida* e *Arco_base_volta*. Os arcos do tipo *Arco_base_ida* são arcos que ligam os nós de partida das bases ($b00$) aos nós de origem dos voos ($2v$). Para cada nó de origem ($2v$) de voo são criados arcos a partir de cada uma das bases, gerando ($v * b$) arcos. Conforme pode ser visto na Figura 3, tem-se os arcos do tipo *Arco_base_ida* ligando cada uma das três bases (B_1 , B_2 , B_3) aos nós 2, 4, 6, 8 e 10, correspondentes às origens dos voos 1 a 5, respectivamente.

Analogamente, os arcos do tipo *Arco_base_volta* ligam os nós de destino ($2v+1$) de cada um dos voos v aos nós de retorno das bases ($b0I$). Assim como nos arcos do tipo *Arco_base_ida*, cada nó de destino de voo é ligado a cada base por um arco. Esse tipo de arco é necessário para assegurar a restrição de que todas as aeronaves devem voltar às respectivas bases no final do dia. Adicionalmente, essa forma de construção possibilita o retorno das aeronaves a qualquer instante em que não possam ser mais aproveitados para outros voos e não necessariamente no final do dia. No caso do exemplo mostrado na Figura 2, os arcos do tipo *Arco_base_volta* correspondem a ligações dos nós 3, 5, 7, 9 e 11 a cada um dos três nós ($10I$, $20I$ e $30I$) que representam o retorno a cada uma das três bases.

É comum as aeronaves realizarem voos vazios, sem clientes, para reposicionamento. “*Deadheading*” ou percurso ocioso é o termo que indica os voos vazios de reposicionamento das aeronaves. São voos de conexão, em que a aeronave, após a conclusão de um voo solicitado por um cliente, parte para outro aeroporto para atender a outro voo solicitado por outro cliente. A aeronave tem que sair do nó de chegada de um voo para o nó de origem de outro voo, como pode ser visto na Figura 3. Os arcos do conjunto *Arco_reposicionamento* ligam os nós ímpares ($2v+1$) aos nós de origem dos próximos voos.

No exemplo da Figura 3, a partir do nó 3 são criados arcos conectando-o aos nós 8 e 10, o que significa que a mesma aeronave que voa o voo 1 pode ser alocada aos voos 4 ou 5, respeitando os respectivos horários de partida. Analogamente, a mesma aeronave que realiza o voo 2 também pode ser utilizada para o voo 4 ou para o voo 5 sem ocasionar atraso na partida do mesmo.

Somente são criados arcos de reposicionamento para voos que obedeçam às restrições temporais que possibilitam o uso da mesma aeronave. Determina-se o horário possível para cada aeronave considerando-se o horário em que a aeronave fique disponível após realizar um determinado voo, adicionado ao tempo de viagem vazia até o local de origem de um próximo voo e ao “*turn around time*”, tempo de preparação da aeronave para outro voo. Caso esse horário calculado em que se torna possível a utilização da aeronave seja anterior ao horário de partida do próximo voo a ser atendido, esse arco do conjunto *Arco_reposicionamento* é criado na rede. É necessário enfatizar que essa condição de viabilidade horária para criação do arco pressupõe que a aeronave seja alocada e possa permanecer aguardando no aeroporto até o

horário de partida do voo seguinte a ser voado. Por esse motivo, no exemplo da Figura 3 não são criados arcos ligando o nó 3 aos nós 4 e 6 e nem o nó 5 ao nó 6.

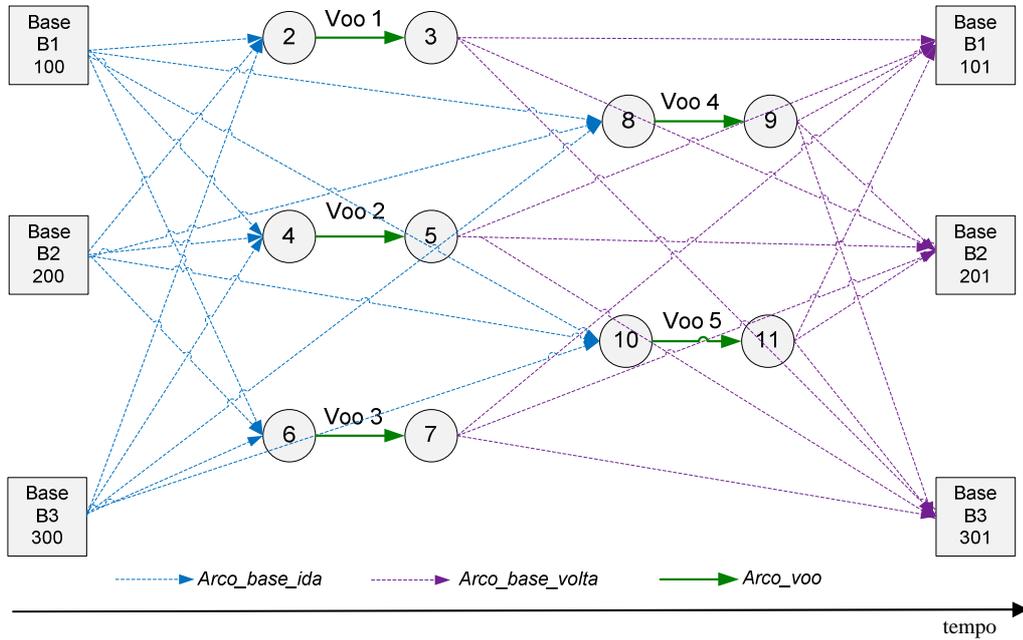


Figura 2 – Rede homogênea com *Arcos_base_ida*, *Arcos_base_volta* e *Arcos_voo*

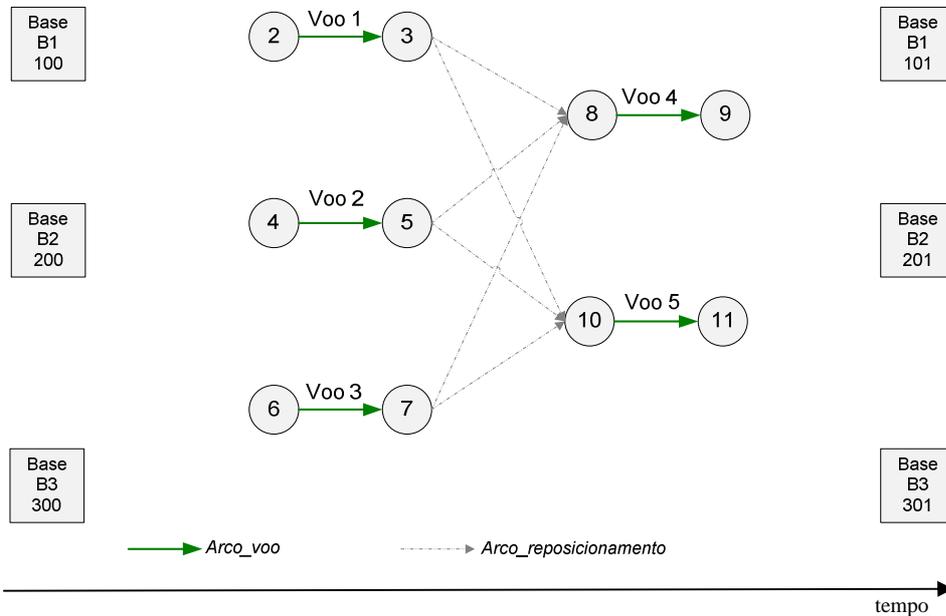


Figura 3– Rede homogênea com *Arcos_reposicionamento* e *Arcos_voo*

Também vale ressaltar que os arcos do conjunto *Arco_reposicionamento* criados na rede não representam necessariamente um percurso aéreo. Pode ocorrer de ser viável utilizar, por

exemplo, a aeronave do voo 2 para o voo 5 e o nó 5 (destino do voo 2) e o nó 10 (origem do voo 5) serem no mesmo aeroporto. Neste caso, o arco do conjunto *Arco_reposicionamento* que conecta os nós 5 e 10 representa apenas que a aeronave deve esperar no aeroporto até o horário de partida do próximo voo, sendo sua distância percorrida igual a zero.

A cada arco $(i, j) \in A$ percorrido por uma aeronave da base b está associado um custo c_{ij}^b . Os custos dos voos somam o consumo de combustível a valores referentes a trabalhos técnicos de manutenção da aeronave para o voo e taxas diversas de operação (como taxas aeroportuárias, catering, suprimentos e despesas da tripulação). As variáveis de decisão do problema são dadas por x_{ij}^b e correspondem aos fluxos de aeronaves nos arcos $(i, j) \in A$. Mais especificamente, $x_{ij}^b = 1$ se uma aeronave da base b utiliza o arco (i, j) e zero caso contrário. A formulação matemática do problema é apresentada a seguir:

Minimizar:

$$z(x) = \sum_{b \in B} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^b x_{ij}^b \quad (1)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{b \in B} x_{ij}^b = 1 \quad \forall (i, j) \in Arco_voo \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in Arco_base_ida} x_{ij}^b \leq f_b \quad \forall b \in B \quad (2)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ij}^b = \sum_{b \in B} x_{ji}^b \quad \forall (i, j) \in A : i, j \in N \setminus Nos_base \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in Arco_base_ida} x_{ij}^b = \sum_{(i,j) \in Arco_base_volta} x_{ij}^b \quad \forall b \in B \quad (4)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ij}^b \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \setminus Arco_voo \quad (5)$$

$$x_{ij}^b \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

A função objetivo (1) representa a minimização dos custos (c_{ij}^b) dos arcos voados em toda a rede. A restrição (2) impõe que o fluxo em cada um dos arcos do tipo *Arco_voo* é igual a um, o que significa que a cada um dos voos programados deve ser alocada uma e somente uma

aeronave. A restrição (3) determina que o número de aeronaves utilizadas não deve exceder a frota alocada para cada base. A verificação deve ser feita base a base, garantindo que o total de aeronaves que parte de uma base não supere a frota alocada àquela base, dada por f_b . A restrição (4) corresponde ao equilíbrio de fluxo nos nós intermediários da rede; em outras palavras, uma aeronave que entre em um nó intermediário obrigatoriamente deve sair dele; ou seja, ao final do dia de operação, nenhuma aeronave permanece nos aeroportos que não são base. Analogamente, deve ser obedecido o equilíbrio de fluxo nos nós base de acordo com a restrição (5), de forma que as aeronaves que saiam de uma base retornem à mesma no final da operação. A restrição (6) complementa a restrição (2) e impõe que cada arco de A exceto os arcos de voo (i.e., *Arco_base_ida*, *Arco_reposicionamento* e *Arco_base_volta*) só pode ser percorrido por no máximo uma aeronave. Finalmente, a restrição (7) garante que as variáveis de decisão de fluxo nos arcos devem ser binárias.

3.3.2 Modelo com frota própria heterogênea

No caso de operação com frota própria heterogênea, a principal diferença em relação ao modelo anterior com frota homogênea é a quantidade de arcos criados na rede, uma vez que devem ser criados todos os arcos discutidos anteriormente para cada tipo de aeronave, conforme detalhado a seguir. A frota conta com tipos k de aeronaves ($k = 1, 2, \dots$), distintas em desempenho e em tamanho. Este fato implica em diferenças não só no número de passageiros que podem ser transportados, mas também no tempo que as diferentes aeronaves necessitam para cobrir o mesmo percurso, dentre outras considerações. Para efeito de ilustração, adotou-se um exemplo com $k = 2$ tipos de aeronaves, conforme a Figura 4.

Os arcos são criados de forma análoga ao caso de frota homogênea, entretanto, possuem um atributo a mais. Além de origem, destino e horário de partida, os arcos são caracterizados também pelo tipo de aeronave. Criam-se dois tipos de arcos de cada conjunto, de acordo com a aeronave que irá percorrê-lo: *Arco_voo_tp1* e *Arco_voo_tp2*; *Arco_base_ida_tp1* e *Arco_base_ida_tp2*; *Arco_base_volta_tp1* e *Arco_base_volta_tp2*; e *Arco_reposicionamento_tp1* e *Arco_reposicionamento_tp2*.

A criação dos arcos obedece à premissa de que nenhum voo pode ser atendido por aeronave de categoria inferior à solicitada. Assim, não são criados arcos do tipo *Arco_base_ida_tp1* e *Arco_reposicionamento_tp1* para nós que sejam origem de voos com aeronave do tipo 2.

Naturalmente, assim como a criação dos arcos da rede é distinta por tipo de aeronave, essa diferenciação também se repete na formulação matemática do problema de frota própria heterogênea, que se encontra resumida na Tabela 1.

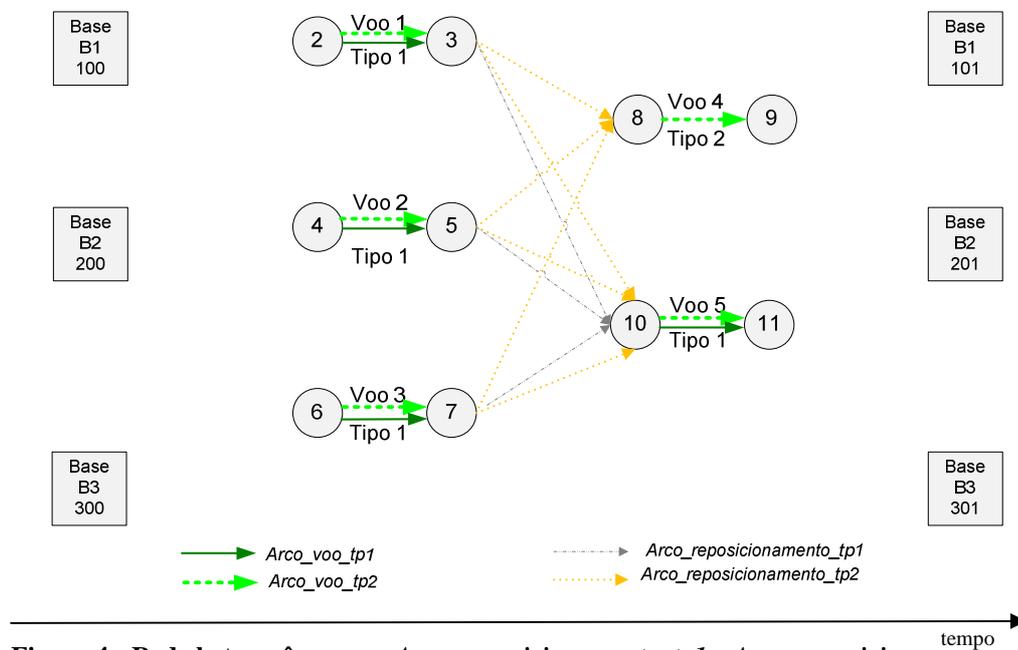


Figura 4 - Rede heterogênea com *Arcos_reposicionamento_tp1* e *Arcos_reposicionamento_tp2*

3.3.3 Modelo com frota homogênea e opção de aluguel

Este modelo de operação considera que exista uma frota própria do operador, homogênea e disponível para atender aos voos solicitados. Contudo, há a opção de alugar aeronaves de terceiros para atender a alguns voos. O uso ou não dessa opção de aluguel é uma decisão do modelo matemático. Ou seja, caso exista algum voo em que, mesmo que haja aeronave da frota própria disponível, compense o atendimento com aeronave alugada, o modelo matemático decidirá pela opção que proporcionar o menor custo. Outra possível alternativa é utilizar essa opção de aluguel caso a frota própria não tenha aeronaves suficientes para atender a todos os clientes.

As condições de criação da rede para este modelo são semelhantes ao caso com frota heterogênea. São considerados dois tipos de aeronaves:

- Tipo 1 – aeronave pertencente à frota própria
- Tipo 2 – aeronave pertencente à frota disponível para aluguel

Para ambos os tipos considerados na modelagem, na prática, as aeronaves são da mesma categoria, portanto, não cabe ao cliente indicar em que aeronave quer voar. Nesse contexto, os resultados da simulação (e, conseqüentemente, os dados de entrada da otimização) são apresentados como uma simulação de frota homogênea, sem distinção entre tipos de aeronaves nos voos.

De maneira similar aos casos apresentados anteriormente neste trabalho, são gerados os conjuntos de nós *Nós_base* e *Nós_intermediários* e os conjuntos de arcos: *Arco_voo*, *Arco_base_ida*, *Arco_base_volta* e *Arco_reposicionamento*, além dos sub-conjuntos por tipo de aeronave. A frota de cada base é expressa por f_b^k , sendo k o indicador do tipo da aeronave (própria ou alugada).

Uma particularidade da formulação adotada nesta pesquisa reside na condição de não considerar as aeronaves de aluguel para voos de “*deadheading*”, ou seja, para cada aeronave alugada só é alocado um voo. O modelo considera apenas que a aeronave alugada vai até o aeroporto de origem do voo e realiza o voo. Deslocamentos posteriores da aeronave alugada são ignorados na modelagem, pois normalmente o custo do voo com uma aeronave alugada já considera o custo de reposicionamento, de modo que não é necessário explicitá-lo no modelo. Em síntese, não são criados *Arco_reposicionamento* para essas aeronaves, ficando esses arcos restritos às aeronaves da frota própria.

A formulação matemática para este problema de frota homogênea com opção de alugar aeronaves externas é idêntica à do problema de frota heterogênea e também está resumida na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das formulações matemáticas para frota própria homogênea, frota própria heterogênea e frota homogênea com opção de aluguel

Restrições	Frota própria homogênea	Frota própria heterogênea	Frota homogênea com opção de aluguel
Função objetivo	Minimizar $z(x) = \sum_{b \in B} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^b \cdot x_{ij}^b$	Minimizar $z(x) = \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^{kb} \cdot x_{ij}^{kb}$	Minimizar $z(x) = \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^{kb} \cdot x_{ij}^{kb}$
Todos os voos atendidos por 1 aeronave	$\sum_{b \in B} x_{ij}^b = 1$ $\forall (i, j) \in Arco_voo$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} = 1$ $\forall (i, j) \in Arco_voo$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} = 1$ $\forall (i, j) \in Arco_voo$
Não usar mais aeronaves do que a frota	$\sum_{(i,j) \in Arco_base_ida} x_{ij}^b \leq f_b$ $\forall b \in B$	$\sum_{(i,j) \in Arco_base_ida} x_{ij}^{kb} \leq f_b^k$ $\forall b \in B ; \forall k \in K ;$	$\sum_{(i,j) \in Arco_base_ida} x_{ij}^{kb} \leq f_b^k$ $\forall b \in B ; \forall k \in K ;$
Equilíbrio de fluxo nos nós intermediários	$\sum_{b \in B} x_{ij}^b = \sum_{b \in B} x_{ji}^b$ $\forall (i, j) \in A : i, j \in N \setminus Nos_base$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} = \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ji}^{kb}$ $\forall (i, j) \in A : i, j \in N \setminus Nos_base$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} = \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ji}^{kb}$ $\forall (i, j) \in A : i, j \in N \setminus Nos_base$
Equilíbrio de fluxo nos nós base	$\sum_{(i,j) \in base_ida} x_{ij}^b = \sum_{(j,i) \in base_volta} x_{ji}^b$ $\forall b \in B$	$\sum_{(i,j) \in base_ida} x_{ij}^{kb} = \sum_{(j,i) \in base_volta} x_{ji}^{kb}$ $\forall b \in B , \forall k \in K ;$	$\sum_{(i,j) \in base_ida} x_{ij}^{kb} = \sum_{(j,i) \in base_volta} x_{ji}^{kb}$ $\forall b \in B , \forall k \in K ;$
Somente 1 aeronave por arco	$\sum_{b \in B} x_{ij}^b \leq 1$ $\forall (i, j) \in A - Arco_voo$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} \leq 1$ $\forall (i, j) \in A - Arco_voo$	$\sum_{k \in K} \sum_{b \in B} x_{ij}^{kb} \leq 1$ $\forall (i, j) \in A - Arco_voo ;$
Variáveis binárias	$x_{ij}^b \in \{0,1\}$	$x_{ij}^{kb} \in \{0,1\}$	$x_{ij}^{kb} \in \{0,1\}$

4. Aplicação Prática

Ambos os modelos foram implementados em ambiente de planilha eletrônica do tipo Microsoft® Office Excel. Planilhas eletrônicas têm um papel importante na Pesquisa Operacional, pois proporcionam uma plataforma eficiente para o desenvolvimento de softwares e ferramentas comerciais e por apresentarem vantagens na distribuição dessas ferramentas para os usuários (Leblanc e Grossman, 2008). A interface para o usuário da

ferramenta e o modelo matemático foram escritos utilizando a linguagem de programação VBA – “*Visual Basic for Applications*” e para a otimização adotou-se o pacote de otimização What’s Best![®] 9.0.3.3, com a licença Industrial, que suporta até 16000 restrições e 32000 variáveis.

A automatização das funções utilizando o VBA não só reduz o risco de erros, como facilita a utilização por usuários que não dominam pesquisa operacional e a implementação dos modelos matemáticos em ambiente de planilha. Além disso, agiliza o uso da ferramenta, uma vez que a operação manual seria muito mais demorada e sujeita a erros, tendo em vista a necessidade de montar o modelo matemático manualmente, caso a caso.

A ferramenta consiste de uma pasta de trabalho composta por 11 planilhas divididas entre dados de entrada, solução do problema e resultados. A sequência de procedimentos para operação da ferramenta pode ser resumida no roteiro passo a passo apresentado a seguir.

Passo 1: O usuário insere dados de entrada da ferramenta nas planilhas referentes ao desempenho da frota, às rotas operadas, aos aeroportos que podem servir como bases de operação e aos custos.

Passo 2: Na planilha “Definições do usuário”, usuário define os parâmetros da simulação: período de simulação (número de dias), número máximo e mínimo de voos por dia e tipo da frota. Clicar no botão “Ir para simulação”.

Passo 3: As macros encaminham o usuário para a planilha “Simulação de Monte Carlo” e preenchem na planilha as informações inseridas pelo usuário no Passo 2. Em seguida, o usuário deve clicar no botão correspondente para iniciar a simulação desejada: Simulação com frota homogênea ou Simulação com frota heterogênea.

Passo 4: A simulação para cada um dos dias do período ocorre automaticamente e, concluída a simulação, o usuário deve clicar no botão “Prosseguir”, através do qual retornará à planilha “Definições do usuário”.

Passo 5: Na planilha “Definições do usuário” cabe ao usuário definir: as bases da operação e a frota de cada base, discriminada por tipo de aeronave. O usuário deve

clicar no botão para prosseguir com a otimização de acordo com a modalidade de operação escolhida.

Passo 6: Após o usuário clicar no botão da planilha de “Definições do usuário” para seguir para a otimização com a modalidade de operação desejada, as macros preenchem os custos fixos das bases e da frota na planilha “Custos”. O usuário é encaminhado à planilha “Otimização”.

Passo 7: O usuário manda executar a otimização. Automaticamente, para cada dia listado na simulação, as macros criam tabelas que organizam os voos, os arcos e o equilíbrio de fluxo nos nós, implantam a função objetivo, definem as restrições e acionam o What’s Best![®] para resolver o problema diário.

Passo 8: Encontrada a solução ótima, as macros preenchem a planilha com os resultados daquele dia de operação e retorna-se automaticamente ao Passo 7 para otimizar o próximo dia.

Passo 9: Concluída a otimização de todos os dias, o usuário é encaminhado para a planilha de resultados que apresenta os valores de custos e frota utilizada para a solução ótima de cada dia.

A fim de avaliar a metodologia proposta e implantada na ferramenta desenvolvida, bem como demonstrar sua aplicabilidade prática, um caso inspirado em situações reais foi aplicado. Os dados de entrada dos problemas não podem ser divulgados, pois algumas informações são sigilosas por questões de mercado. Os dados do caso foram inspirados em um caso real e adaptados para a aplicação neste trabalho. Por outro lado, tais impedimentos não atrapalham a compreensão deste texto, que objetiva demonstrar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida. Mais especificamente, a aplicação da ferramenta nos casos práticos pretende ilustrar que tipos de análises podem ser feitas e os resultados transcritos neste trabalho não refletem a realidade.

O caso prático em questão representa uma empresa que administra de aeronaves compartilhadas que pretende operar no Brasil. A operação pretende abranger 40 rotas distribuídas entre os 13 aeroportos apresentados na Figura 5. O objetivo é determinar quais

dos 13 aeroportos servirão de base de operação e quantas aeronaves devem ser alocadas para cada base, considerando-se operação com frota homogênea e com frota heterogênea.

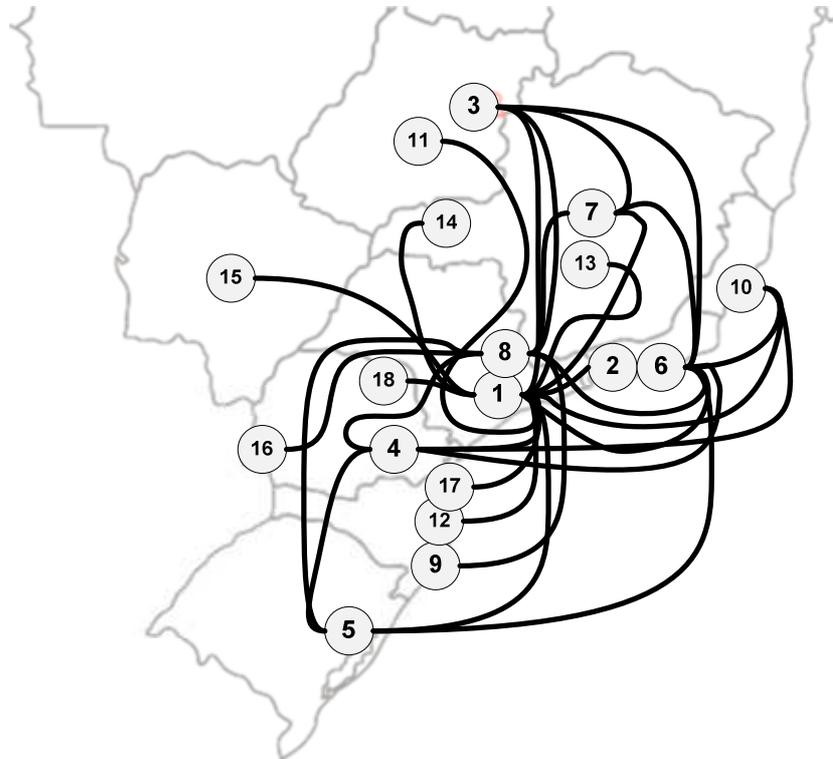


Figura 5 – Mapa com as rotas do caso prático

Para o caso prático da operação no Brasil com frota homogênea, foram testadas cinco configurações em que se variava o número de bases: com três bases, com duas bases e aeroportos distintos, e com somente uma base. Percebeu-se que, em comparação à configuração com três bases, a configuração com duas bases resultou maior distância total voada em voos de reposicionamento; entretanto, a quantidade de aeronaves necessárias foi a mesma. Todavia, a configuração que se apresentou como a mais econômica no custo total foi a configuração com apenas uma base, como pode ser visto no sumário de resultados apresentados na Tabela 2.

Para o mesmo caso foi realizada uma nova simulação onde se ampliou a quantidade de voos. Foram repetidas as mesmas cinco configurações elaboradas para a análise anterior com o objetivo de avaliar como a duplicação da quantidade de voos influencia o número de aeronaves utilizadas e de voos de reposicionamento necessários.

Tabela 2 – Resultados de um dia para as configurações com frota própria homogênea para 15 voos

Configurações	Config. 1 SPSP/SBGL/SBCF	Config. 2 SBSP/-/SBCF	Config. 3 SBSP/SBGL/-	Config. 4 -/SBGL/SBCF	Config. 5 SBSP/-/-
Frota necessária SBSP/SBGL/SBCF	5 / 1 / 2	6 / - / 2	4 / 2 / -	- / 6 / 2	6 / - / -
Nº de voos de reposicionamento (e % em relação ao total de voos)	7 (18%)	7 (18%)	9 (25%)	7 (18%)	9 (25%)
Custos dos voos (\$/dia)	\$ 8.544	\$ 8.544	\$ 8.544	\$ 8.544	\$ 8.544
Custos dos voos de reposicionamento (\$/dia).	\$ 2.238	\$ 1.508	\$ 2.668	\$ 1.051	\$ 2.668
Custos dos voos para as bases (\$/dia)	\$ 1.845	\$ 2.637	\$ 2.575	\$ 6.036	\$ 3.261
Custos de todos os voos (voos + voos de reposicion. + voos para bases) (\$/dia)	\$ 12.627	\$ 12.690	\$ 13.788	\$ 15.631	\$ 14.473
Custo médio diário de operação das bases (\$/dia)	\$ 41.279	\$ 27.519	\$ 27.519	\$ 27.519	\$ 13.759
Custo médio diário total (custos dos voos + custos das bases) (\$/dia)	\$ 53.907	\$ 40.209	\$ 41.307	\$ 43.151	\$ 28.233
% de acréscimo do custo médio diário total em relação ao mínimo	48%	30%	32%	35%	0%

Percebeu-se que com o dobro de voos por dia, a quantidade de aeronaves necessárias para atender aos voos é, em média, 38% maior do que a quantidade para atender à metade dos voos. Observa-se ainda que para estes 30 voos foram realizados 58% a mais de voos de reposicionamento em relação à lista anterior de 15 voos. E o custo médio diário total para os 30 voos foi 51% maior do que o custo médio diário total para 15 voos.

No caso com frota própria heterogênea e operação no Brasil, foi realizada a simulação e a otimização para 30 dias de operação. Em seguida, outra rodada de otimização foi realizada onde foi imposta uma restrição para voos de reposicionamento com o objetivo de avaliar o impacto que o reposicionamento de aeronaves tem no custo total da operação e na quantidade de aeronaves utilizadas. Os resultados mostraram que a proibição de voos vazios provocou um aumento de, em média, 9% no custo total dos voos por dia e que a quantidade de aeronaves utilizadas aumentou em 38%.

A análise para um período longo, de 30 dias, quando não há variações no padrão de demanda de vôos de dia para dia, possibilita diluir a variabilidade inerente à simulação de Monte Carlo e, conseqüentemente, reduzir as incertezas quanto aos resultados obtidos. Deve-se ressaltar que, conforme mencionado anteriormente, a dificuldade de prever a demanda pelo serviço de jatos compartilhados é um dos maiores fatores de incerteza enfrentados na fase inicial de planejamento das operações e de análise de viabilidade do negócio; no entanto, alguma estimativa das solicitações diárias de voos como a proporcionada pela simulação de Monte Carlo é fundamental para permitir uma estimativa da frota necessária de aeronaves e dos percursos ociosos de reposicionamento. Nessa fase da análise os dados disponíveis são muito escassos, ou praticamente inexistentes, tendo em vista trata-se de um plano de negócio futuro, ainda não existente; em outras palavras, dispõe-se apenas de dados gerais sobre o mercado, da região a ser atendida, e de rotas potenciais a serem operadas, porém sem conhecimento da demanda real ou histórica de solicitações. Nesse contexto, a simulação apresenta-se como uma alternativa para contornar essa imprevisibilidade da demanda, uma vez que permite analisar, de maneira simples e fácil, diferentes cenários de requisições de voos, oferecendo a possibilidade de superar as incertezas inerentes a essa fase inicial de avaliação da viabilidade de um novo negócio através de análises de sensibilidade. Assim, diferentemente de outras aplicações de simulação de Monte Carlo, neste contexto não faz sentido reportar e analisar

desvios das replicações da simulação nem tampouco propor algum teste de hipóteses de resultados.

Outro recurso disponível para análises utilizando a ferramenta de simulação e otimização de aeronaves é a possibilidade de avaliar diferentes políticas operacionais, como a adoção de frota homogênea ou heterogênea ou então avaliar a viabilidade da substituição de uma ou mais bases de operação com frota própria por uma base somente com aluguel de aeronaves.

Os resultados permitem ponderar dentre as diversas configurações testadas, qual é mais estável no longo prazo, qual aloca menos aeronaves, qual economiza mais combustível, qual alteração de base de maior impacto, e assim por diante. Ou seja, o planejador pode obter os dados necessários da operação para que seja possível decidir o que é melhor para seu negócio, ponderando fatores subjetivos que não fazem parte do problema matemático.

5. Conclusões e Recomendações

A metodologia abordada nesta pesquisa para o desenvolvimento de uma ferramenta de planejamento que engloba um modelo de simulação e alocação de aeronaves de propriedade compartilhada foi implementada e testada com dados de casos práticos do Brasil e dos EUA. Com o objetivo de auxiliar no planejamento de uma empresa de jatos compartilhados, a ferramenta desenvolvida permite análises referentes à localização das bases e à distribuição da frota de aeronaves entre as bases escolhidas.

As características do problema, apresentadas na seção 3, compõem um sistema abrangente das principais restrições do modelo de negócio de jatos executivos compartilhados. Essa abrangência permite que a metodologia de solução proposta, que integra Simulação de Monte Carlo e modelagem como fluxo em rede, possa ser empregada para outros casos de alocação de veículos com demanda variável com as mesmas características, feitas as devidas considerações sobre as particularidades de cada caso.

A atuação conjunta e complementar de simulação e otimização é uma abordagem de grande potencial que tem sido estudada para diversos tipos de problemas logísticos. Neste caso, a simulação pelo método de Monte Carlo permite representar a variação da demanda por viagens de maneira coerente com as probabilidades de ocorrência das rotas de voos. Essa

variação é essencial para representar a aleatoriedade do problema. A estruturação do problema como um caso de fluxo em rede de mínimo custo permite que seja encontrada a solução ótima para a alocação diária das aeronaves.

O modelo de simulação e alocação de aeronaves mostrou-se robusto, capaz de resolver problemas de grande porte, com grande quantidade de voos diários e um longo período de simulação, e apresentar a solução ótima para cada caso. Entretanto, o problema de jatos compartilhados é complexo e dinâmico, com muitas restrições e variáveis. Neste trabalho foram incluídas as restrições básicas de operação. Em uma extensão desta pesquisa, generalizações podem ser feitas para, por exemplo, impor uma frota mínima a ser utilizada de cada base para evitar bases ociosas e garantir alta utilização da frota; considerar regras de trabalho da tripulação; ou então aprimorar o modelo de simulação para distinguir picos de demanda.

A flexibilidade promovida pela construção da ferramenta em ambiente de planilha eletrônica também permite a integração com outras ferramentas utilizadas no planejamento. Há a possibilidade de associar o uso desta ferramenta com outras de análise de fatores econômicos ou de gerenciamento de tripulação, por exemplo.

Referências

- Butler, J. D. (2008). Buyer's Guide – The fundamentals of fractional ownership. *Business Jet Traveler Online*. Artigo publicado em 07 de janeiro de 2008. Disponível em: <<http://www.bjtonline.com/flying/inside-fractionals/s/p/1/article/the-fundamentals-of-fractional-ownership-512.html>>. Acesso em 13 de Abril de 2009.
- Cordeau, J. F.; Stojkovic, G.; Soumis, F. e Desrosiers, J. (2001). Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling. *Transportation Science* v. 35, p. 375-388.
- Cortes, C. S.; Cunha, C. B. (2010). Modelo de decisão para a programação de entrega de concreto produzido em centrais. In: *XVI Congresso Pan-Americano em Engenharia de Tráfego e Transporte e Logística 2010*. Lisboa. Anais do XVI Congresso Pan-Americano em Engenharia de Tráfego e Transporte e Logística 2010.
- Espinoza, D.; Garcia, R.; Goycoolea, M.; Nemhauser, G.L. e Savelsbergh, M. W. P. (2008). Per-seat, On-Demand Air Transportation Part I: Problem Description and an Integer Multicommodity Flow Model. *Transportation Science* v. 42, n. 3, p. 263-278.
- Fink, A.; Reinert, T. (2006). Modeling and solving the short-term car rental logistics problem. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review* n.42, p. 272-292.

- Hicks, R.; Madrid, R.; Milligan, C.; Pruneau, R.; Kanaley, M.; Dumas, Y.; Lacroix, B.; Desrosiers, J. e Soumis, F. (2005). Bombardier flexjet significantly improves its fractional ownership operations. *Interfaces* v. 35, n. 1, p. 49-60.
- Keskinocak, P. e Tayur, S. (1998). Scheduling of time-shared jet aircraft. *Transportation Science* v. 32, n. 3, p. 227-294.
- LeBlanc, L. J.; Grossman, T. A. (2008). Introduction: The Use of Spreadsheet Software in the Application of Management and Operations Research. *Interfaces* v.38, n. 4, p. 225--227
- Martin, C.; Jones, D. e Keskinocak, P. (2003). Optimizing on-demand aircraft schedules for fractional aircraft operators. *Interfaces* v. 33, n.5, p. 22-35.
- Mooney, C. Z. (1997). Monte Carlo Simulation. (*Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences 07-116*). Thousand Oaks, CA, Sage.
- Preston, H. H. (2009). Private Jet Cards emerge as alternative to ownership. *The New York Times*. Artigo publicado em 28 de agosto de 2009. Disponível em: <http://www.nytimes.com/2008/08/29/business/worldbusiness/29iht-mjets3.4.15748655.html?pagewanted=1&_r=1>. Acesso em 15 de maio de 2010.
- Silva, G. P. (2001). *Uma metodologia baseada na técnica de geração de arcos para o problema de programação de veículos*. 146p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo.
- Stojkovic, G.; Soumis, F.; Desrosiers, J.; Solomon, M. M. (2002). An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research Part A* 36, p. 779-788.
- Thurber, M. (2010). A peek ahead. *Business Jet Traveler*. Artigo publicado em 01 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.bjtonline.com/special-reports/s/p/1/article/a-peek-ahead-2492.html>. Acesso em 13 de setembro de 2010.
- Yao, Y.; Ergun, Ö.; Johnson, E.; Schultz, W. e Singleton, J. M. (2007). Strategic Planning in Fractional Aircraft Ownership Programs. *European Journal of Operation Research* n. 189(2), p. 526-539.