

MODELO DE SIMULAÇÃO APLICADO ÀS MISSÕES DE TRANSPORTE NA REGIÃO AMAZÔNICA

SIMULATION MODEL APPLIED TO TRANSPORTATION MISSIONS IN THE AMAZON REGION

O 1º Ten Eng João Paulo de Andrade Dantas concluiu em 2015 a graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Possui mestrado pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Eletrônica e Computação (PG/EEC) no ITA e atualmente é pesquisador do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) no Grupo de Ciência de Dados da Divisão de C4ISR.

Contato: jpdantas@gmail.com



O Cap Av Caio Augusto de Melo Silvestre concluiu o CFO em 2011. Em 2014, realizou o Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Em 2018, concluiu o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) no ITA. Atualmente é Adjunto da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento no Instituto de Aplicações Operacionais (IAOp).

Contato: caio.silvestre.1990@gmail.com



RESUMO

A região amazônica representa um grande desafio logístico aéreo para a Força Aérea Brasileira (FAB), pois a manutenção dos principais Pelotões Especiais de Fronteira (PEFs) demanda a constante realização de missões de transporte de pessoas e de cargas em áreas remotas. Nesse contexto, o artigo propõe um modelo de simulação que possibilite a otimização do uso de recursos da FAB por meio de um planejamento mais eficiente das rotas aéreas. Amostras dos últimos voos realizados foram utilizadas para realização da modelagem estatística do problema e validação do modelo de simulação, fornecendo uma abordagem mais realista do sistema complexo analisado. O modelo de simulação proposto constitui-se da modelagem estocástica dos processos de carregamento e descarregamento de carga no aeródromo de São Gabriel da Cachoeira (SBUA) e nos PEFs da Região do Alto do Rio Negro. Como estudo de caso, foram analisados os impactos da redução do tempo de carregamento em SBUA na execução da missão aérea. Este modelo de simulação pode ser aplicado no contexto operacional das missões aéreas realizadas pela FAB e fornecer uma metodologia robusta de planejamento de missões aéreas na região.

Palavras-Chave: Região Amazônica, Simulação, Transporte Aéreo.

ABSTRACT

The Amazon region represents a major air logistical challenge for the Brazilian Air Force (FAB), as the maintenance of the main Special Border Platoons (PEFs) demands the constant accomplishment of missions to transport people and cargo in remote areas. In this context, the article proposes a simulation model that allows the optimization of the use of FAB's resources through a more efficient planning of the air routes. Samples of the last performed flights were used to elaborate the statistical modeling of the problem and validation of the simulation model, providing a more realistic approach of the analyzed complex system. The proposed simulation model consists of stochastic modeling of the loading and unloading processes at the airfield of São Gabriel da Cachoeira (SBUA) and at the PEFs of the upper Rio Negro region. As a case study, the impacts of the reduction of the loading time at SBUA on the execution of the air mission were analyzed. This simulation model can be applied in the operational context of the air missions performed by FAB and provide a robust methodology for planning regional air missions.

Keywords: Amazon Region, Simulation, Air Transportation.

I – INTRODUÇÃO

Com o objetivo de garantir a conservação e proteção territorial do Brasil na Região Amazônica, o Exército Brasileiro criou os Pelotões Especiais de Fronteira (PEFs). Estes pelotões se localizam em regiões remotas e de difícil acesso e sua função é ser a presença do estado nas regiões de fronteira. A região escolhida para o presente estudo é a de São Gabriel da Cachoeira, conhecida como “cabeça do cachorro”. Esta região se destaca pela importância estratégica por estar localizada entre os três países Colômbia, Venezuela e Peru, por tratar-se de uma região rica em biodiversidade, por ser usada como rota para o tráfico de drogas e por grupos não-estatais e por demandar proteção do povo indígena [2]. Nessa região, o Exército é responsável por manter o suprimento de seis PEFs: Yauaretê, Querari, São Joaquim, Cucui, Maturacá e Pari-Cachoeira. Usualmente, a maior parte do suprimento enviado para essas localidades é transportado pela Força Aérea Brasileira (FAB) através do Plano de Apoio à Amazônia (PAA). Para a região em estudo, toda a carga a ser distribuída é concentrada em São Gabriel da Cachoeira, o que o torna o hub aéreo principal.

A utilização de aeronaves, apesar de ser o modal mais caro, proporciona rapidez no transporte entre o PEF e o centro de apoio da região, além de oferecer maior confiabilidade para a continuidade do suprimento logístico e, em alguns casos, ser a única maneira de se chegar à região transportando grandes quantidades de carga. As restrições presentes para a operação aérea são a meteorologia (principalmente nos PEF que não são dotados de auxílios à navegação aérea, restringindo as operações no aeródromo apenas a condições visuais), a disponibilidade da aeronave e as condições estruturais das pistas. A cada ciclo mensal, uma aeronave de transporte da FAB do tipo C-105 Amazonas desloca-se para o aeródromo de SBUA e, a partir desse local, distribui os mantimentos para os PEFs de forma contínua.

Nesse cenário, pode-se empregar um modelo de simulação de sistema logístico para auxiliar a tomada de decisão. Para tanto, foram utilizadas amostras das missões aéreas realizadas nos últimos dois anos para a modelagem estatística do problema e validação do modelo de simulação proposto. Inicialmente, na seção II, são discutidas a coleta e a análise dos dados utilizados. No tópico seguinte, é realizada a priorização das variáveis mais relevantes a serem exploradas. Em seguida, na seção III, é discutida a simulação conduzida por meio do software FlexSim, contendo análises e discussões dos resultados nela obtidos e sua comparação com os valores esperados para as missões aéreas. Além disso, a referida seção apresenta um estudo de caso aplicado ao processo de carregamento em São Gabriel

da Cachoeira, no qual foi analisado como pequenas variações no tempo de carregamento impactam o tempo total da missão. Na seção IV, foram realizadas as considerações finais com sugestões para trabalhos futuros no tema proposto.

II – COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para a realização deste trabalho, foram coletados os dados das operações na região de São Gabriel da Cachoeira contidos nos relatórios diários de operação do 1º/9º GAv, Esquadrão Arara, do 2º semestre de 2016 e 1º semestre de 2017, totalizando 557 amostras. Cada amostra consiste em um voo, no qual são especificados parâmetros como rota, horário de decolagem, horário de pouso e peso da carga transportada. Como a operação é contínua, é possível obter o tempo de pré-voo (carregamento, descarregamento e abastecimento) por meio do intervalo de tempo entre o último pouso e a próxima decolagem com exceção da primeira decolagem do dia. Nesse caso, obtém-se o tempo de pré-voo pela diferença entre o horário da primeira decolagem e o tempo de início da operação, que é definido como sete horas da manhã. Foram analisadas as missões de transporte de carga realizadas entre a cidade de São Gabriel da Cachoeira (SBUA) e as cidades Maturacá (SWMK), Cucui (SWKU), São Joaquim (SWSQ), Querari (SWQE), Yauaretê (SBYA) e Pari-cachoeira (SWPC). As rotas aéreas encontram-se dispostas na Fig. 1 a seguir.

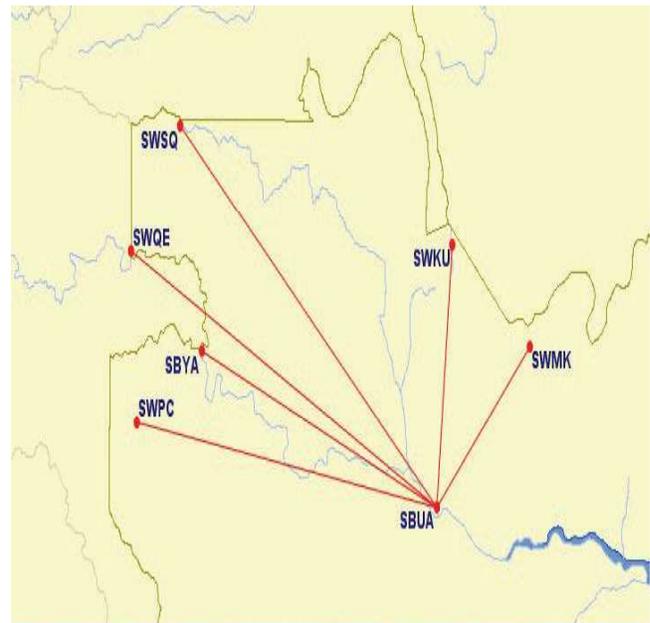


Figura 1 – Rotas Aéreas na Região de São Gabriel da Cachoeira.

Cada missão aérea consiste em um voo partindo de SBUA para um determinado PEF e o seu respectivo voo de retorno, porém cada amostra do conjunto de dados consiste nos dados de apenas um voo. Para a modelagem do problema proposto, foi

empregada a distribuição de *Erlang* para os tempos de pré-voo, mostrando-se bastante apropriado na modelagem do tempo de atendimento aeroportuário.

III – SIMULAÇÃO

A. Definição do Modelo

A partir da análise quantitativa dos dados coletados e por meio de entrevistas com os responsáveis pelo planejamento das missões aéreas, foi possível verificar que os fatores mais relevantes para se planejar uma missão aérea deste tipo são o tempo de carregamento e a carga transportada por voo. Surpreendentemente, mesmo existindo uma doutrina rígida para maximização da quantidade de carga transportada por voo, para uma maior eficiência no transporte, percebe-se que o peso da carga por perna de voo varia bastante. Isto se dá pela grande variabilidade dos tipos de cargas que as aeronaves precisam transportar na região.

O outro fator crítico para o planejamento é o tempo de carregamento no aeroporto central (SBUA) e nos PEFs. A grande variabilidade deste dado se dá pelas precárias condições de infraestrutura aeroportuária, que dificultam a logística de transporte de carga e pessoas. Além destes, as condições meteorológicas altamente imprevisíveis da região afetam as missões aéreas de forma peculiar. Devido à falta de informação meteorológica precisa sobre a situação dos aeródromos dos PEFs, em algumas ocasiões o piloto só percebe que é incapaz de pousar no aeródromo quando sobrevoa o mesmo. Isso faz com que o dobro de horas de voo, relativas a uma determinada rota, sejam gastas.

Para obter melhores estimativas do tempo necessário para realizar as operações e assim fornecer um indicativo do melhor dimensionamento do problema para um certo nível de serviço, foi criado um modelo de simulação empregando o *software* FlexSim. Esse *software* foi empregado devido à facilidade de aplicação de aspectos temporais na simulação. A estrutura do modelo consiste basicamente na modelagem de SBUA, dos PEFs a serem atendidos e da aeronave de transporte. A Fig. 2 ilustra o modelo geral de simulação.



Figura 2 - Cenários simulados no Software FlexSim.

Para a realização das simulações das missões de transporte na região amazônica, a aeronave foi modelada com as seguintes especificações:

1. A velocidade máxima corresponde à velocidade média dos voos na região. Foi considerada uma alta aceleração e desaceleração de forma que a aeronave se mova praticamente com a velocidade máxima;
2. A capacidade corresponde a um valor unitário, já que não será modelada a carga transportada por trecho de voo;
3. O tempo de carregamento corresponde à distribuição estatística que melhor se ajusta ao intervalo de tempo de pré-voo dos trechos de SBUA para os PEFs;
4. O tempo de descarregamento corresponde à distribuição estatística que melhor se ajusta ao intervalo de tempo de pré-voo dos trechos dos PEFs para SBUA;
5. Foi inserida uma tabela de tempo de forma a modelar a operação somente em período diurno. Além disso, foi configurada uma função que determina que a aeronave retorne a São Gabriel da Cachoeira quando iniciar o período noturno.

Por fim, acrescentou-se o mecanismo para simular os trechos de voo perdidos, isto é, aquelas em que o piloto não consegue pousar no PEF.

Assim, a aeronave tem uma probabilidade de, quando sair de SBUA, prosseguir até o destino e ter que voltar sem que a carga tenha sido descarregada no PEF. Esse processo, em geral, ocorre devido as condições da pista no aeródromo de destino e da meteorologia não favorável para realizar o pouso.

B. Dados de Entrada

Tabela 1 - Voos entre São Gabriel da Cachoeira e os PEFs.

ROTA	DISTÂNCIA (NM)	TEMPO DE VOO MÉDIO	VELOCIDADE MÉDIA (NM/MIN)
São Gabriel da Cachoeira - Maturacá	70	00:26:29	2,64
São Gabriel da Cachoeira - São Joaquim	184	00:58:16	3,16
São Gabriel da Cachoeira - Querari	187	01:00:52	3,07
São Gabriel da Cachoeira - Yauretê	140	00:47:14	2,96
São Gabriel da Cachoeira - Pari-Cachoeira	171	00:55:45	3,06

Para determinar a velocidade de deslocamento do objeto utilizado para emular a aeronave na simulação, empregou-se os dados expostos na Tabela 1.

Por meio da análise dos dados de distância e tempo de voo médio expostos, é possível encontrar uma velocidade média de 2,98 NM/min para a aeronave C-105 Amazonas operando nas rotas aéreas da região amazônica.

Já em relação aos tempos de carregamento e descarregamento, o FlexSim permite a modelagem destes intervalos por meio de uma distribuição estatística específica. De forma a se aplicar os dados coletados da maneira mais realista, escolheu-se o emprego da distribuição de **Erlang**, pois é uma distribuição de probabilidade contínua com ampla aplicabilidade, principalmente devido à sua relação com a distribuição exponencial e a distribuição gama. Esta distribuição é utilizada em várias áreas que aplicam processos estocásticos, inclusive para tempos de atendimento de serviços aeroportuários. Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x, k, \beta) = \frac{x^{k-1} e^{-x/\beta}}{\beta^k (k-1)!} \quad (1)$$

Temos que B é o parâmetro de escala e $k > 0$ [3]. No ponto de vista dos processos estocásticos, a distribuição *Erlang* é a distribuição da soma de k variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas exponencialmente. No FlexSim, um intervalo de tempo distribuído pela distribuição de *Erlang* é dado por:

$$f(x, k, \beta) = \gamma + \frac{x^{k-1} e^{-x/\beta}}{\beta^k (k-1)!} \quad (2)$$

O fator Y é chamado de parâmetro de localização [4]. Neste modelo, a média é dada por:

$$\mu = \gamma + k \cdot \beta \quad (3)$$

Já a variância é dada por:

$$\sigma^2 = k \cdot \beta^2 \quad (4)$$

IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Operação Simulada

Para realizar a análise do modelo de simulação, configurou-se uma demanda com quarenta voos para cada PEF. Os dados coletados foram os intervalos de tempo dos estados da aeronave de transporte. De forma a permitir a visualização de uma rotina de operação típica dos voos simulados, expõe-se, na Tabela 2, três dias de operação simulada.

Tabela 2 - Operação Simulada.

INÍCIO	TÉRMINO	ATIVIDADE	DURAÇÃO
07:00	08:10	Carregamento	1:10
08:10	09:08	Voo São Gabriel da Cachoeira - PEFs	0:58
09:08	10:08	Descarregamento	1:00
10:08	11:05	Voo PEFs - São Gabriel da Cachoeira	0:57
11:05	13:05	Carregamento	2:00
13:05	14:01	Voo São Gabriel da Cachoeira - PEFs	0:56
14:01	15:10	Descarregamento	1:09
15:10	16:06	Voo PEFs - São Gabriel da Cachoeira	0:56
16:06	17:31	Carregamento	1:25
17:31	06:56	Pausa	13:25

De maneira quantitativa, percebe-se que o valor da variável tempo, em cada processo analisado, se assemelha ao executado pelo esquadrão de voo na Amazônia. Com relação à velocidade média da aeronave simulada, observou-se que esta percorreu uma distância total de 5945 NM e voou por 2039,1 minutos. A partir disso, temos que os voos simulados foram executados com uma velocidade média de 2,92 NM/min, a qual, em relação à velocidade média esperada, possui um erro relativo de 2%. Isso mostra a adequação do modelo proposto ao problema.

Além disso, observou-se sobre os duzentos trechos de voos previstos, que a aeronave perdeu quatro trechos de voo e, dessa forma, executou quatro idas a menos aos determinados PEFs. O índice de perda de voos foi de 2%, que se mostrou condizente, pois o valor modelado foi de 1%.

O tempo de voo de cada missão é uma va-

riável que, em geral, tem poucas variações. Para a simulação proposta, o parâmetro modelado mais importante foi o tempo de pré-voos, pois esse é um fator decisivo para o bom andamento das missões e seus possíveis atrasos. A Fig. 3 ilustra o histograma dos intervalos de tempo de pré-voos nos voos de São Gabriel da Cachoeira aos PEFs.

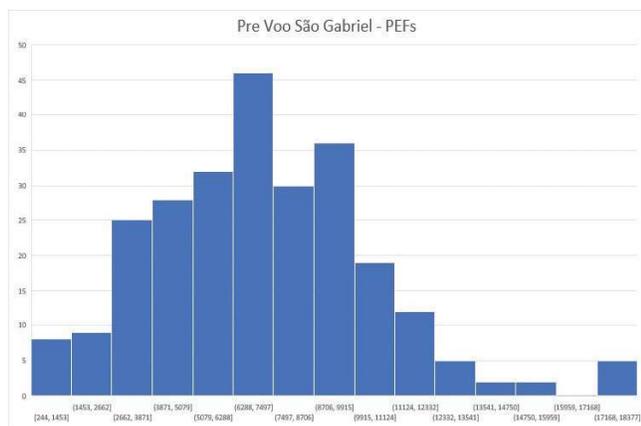


Figura 3 - Histograma de tempo de pré-voos simulado no trecho São Gabriel da Cachoeira – PEFs.

O valor médio da amostra simulada é de 119,89 minutos, denotando um erro absoluto em relação à média dos dados coletados de 11,6 minutos e um erro relativo de 8,8%.

Já com relação ao tempo de pré-voos dos trechos dos PEFs para São Gabriel da Cachoeira, o modelo simulado forneceu a distribuição de dados da Fig. 4.

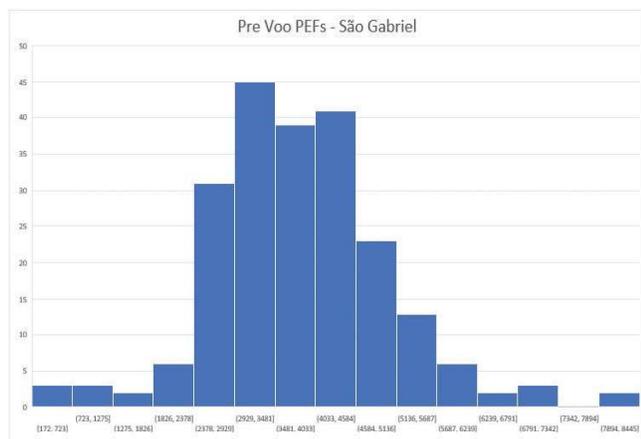


Figura 4 - Histograma de tempo de pré-voos simulado no trecho PEFs – São Gabriel da Cachoeira.

De forma similar aos dados expostos anteriormente, o valor médio da amostra é de 63,9 minutos, denotando um erro absoluto em relação à média dos dados coletados de 3,5 minutos e um erro relativo de 4,7%.

B. Estudo de Caso

Como exposto anteriormente, o fator com maior variabilidade é o tempo de carregamento em São Gabriel da Cachoeira. Este intervalo de tempo pode ser reduzido com o desenvolvimento de novos processos logísticos, de infraestrutura aeroportuária e apoio operacional. Nesse estudo de caso, foi feita uma estimativa da redução do tempo total da missão para embasar as decisões de autoridades, com base em variações do tempo de carregamento.

Assume-se como hipótese a redução do tempo médio de carregamento em São Gabriel da Cachoeira em fatores de 10%, 15% e 20%.

Os parâmetros observados são o tempo total de missão em dias e o tempo total de solo em São Gabriel da Cachoeira e nos PEFs. A missão modelada consiste em vinte trechos de voo no total ou cinco idas aos PEFs da região mais ocidental.

Tabela 3 - Estudo de Caso.

EXPERIMENTOS	DURAÇÃO DA MISSÃO (DIAS)	TEMPO DE SOLO (HORAS)
Operação Normal	10	50:75
Redução de 10%	9,5	48:14
Redução de 15%	9	44:75
Redução de 20%	8	40:14

Por meio dos dados coletados, percebe-se apenas pequenas variações no tempo gasto para realizar o carregamento, as quais impactam de forma significativa no total de dias de operação. A redução no tempo total da missão diminui os gastos com diárias e apoios em geral, além de tornar a aeronave disponível para outras missões.

O aprofundamento desse modelo de simulação de missões de transporte pode proporcionar análises mais otimizadas das rotas aéreas e pode, principalmente, ser utilizado como um meio eficaz para tomada de decisão. Desta forma, a Força Aérea Brasileira poderá operar seus vetores de modo mais produtivo, proporcionando um melhor apoio logístico na região amazônica.

IV – CONCLUSÕES

O transporte aéreo de cargas e passageiros é um grande desafio no dia a dia das operações logísticas no país, principalmente na região Amazônica, que é considerada zona crítica por ser uma região de fronteira. Para melhor verificação das missões logísticas que ocorrem na região de São Gabriel da Cachoeira, foi realizada uma simulação de um sistema complexo que inclui o transporte aéreo e logístico

dos Pelotões Especiais de Fronteira na Amazônia. O modelo de simulação proposto constitui-se da modelagem estocástica dos processos de carregamento e descarregamento de carga no aeródromo de SBUA e nos Pelotões de Fronteira da Região do Alto do Rio Negro. Como estudo de caso, foram analisados os impactos da redução do tempo de carregamento em SBUA na execução da missão aérea.

Este modelo de simulação pode ser aplicado no contexto operacional das missões aéreas realizadas pela FAB e pode fornecer, por meio de desenvolvimentos futuros, uma metodologia robusta de planejamento de missões aéreas na região. A metodologia apresentada neste artigo deve ser vista como uma ferramenta de apoio aos profissionais responsáveis pelo suprimento de regiões com difícil acesso no país.

Para próximos estudos, propõe-se uma análise aprofundada de otimização das missões de transporte na região amazônica por meio de algoritmos específicos aplicados à logística aérea, como a heurística de *Clarke e Wright* [5] ou a meta-heurística *Iterated Local Search (ILS)* [6], que permitirão uma priorização das missões que devem ser realizadas na região amazônica, garantindo um melhor aproveitamento dos voos da FAB.

REFERÊNCIAS

[1] COMAER - Comando da Aeronáutica. **Manual de Rotas Aéreas**. ROTAER, 2013.

[2] PILETTI, F. J. **Segurança e defesa da Amazônia: o Exército Brasileiro e as ameaças não tradicionais**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, 2008.

[3] COX, D.R. **Renewal Theory**. Methuen, p. 20, 1967.

[4] FLEXSIM. **Erlang Distribution**. Disponível em: <<https://answers.flexsim.com/articles/14145/erlang-2.html>>. Acesso em 9 maio 2018.

[5] SEGERSTEDT, Anders. **A simple heuristic for vehicle routing – A variant of Clarke and Wright's saving method**. International Journal of Production Economics, v. 157, p. 74-79, 2013.

[6] SILVA, D.M. **Uma heurística para o problema de veículos com múltiplas viagens**. Dissertação de Mestrado. UFF, Rio de Janeiro. 2012.