

Efeitos da prática de tanqueamento na segurança das operações aéreas: o caso da aviação geral

Effects of tankering practice on safety of air operations: the case of general aviation

Reinaldo Moreira Del Fiaco¹, Camila Maestrelli Leobons², Wesley Braytiner de Souza Silva³, Paulo Afonso Lopes da Silva⁴

¹Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – Brasil, reinaldodelfiaco@outlook.com.br

²Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – Brasil, camila@maestrelli.org

³Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – Brasil, wesleybraytiner@gmail.com

⁴Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – Brasil, pauloafonsolopes@ime.eb.br

Recebido:

14 de junho de 2018

Aceito para publicação:

30 de dezembro de 2020

Publicado:

27 de outubro de 2021

Editor de área:

Alexandre Gomes de Barros

Palavras-chave:

Segurança de voo.

Tanqueamento.

Otimização.

Fator humano.

Keywords:

Flight safety.

Fuel tankering.

Optimization.

Human factor.

DOI:10.14295/transportes.v29i4.1730



RESUMO

O gasto de combustível representa a maior parcela do custo operacional na aviação, e a sua falta, ou pane seca, é um dos fatores que mais contribuem contribuintes para os acidentes aeronáuticos. O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo de programação não linear para minimizar o custo total com abastecimento por meio da prática de tanqueamento, observando as restrições de regra de voo, operacionais e físicas da aeronave. Foi realizada uma simulação de quatro voos para encontrar qual a quantidade de combustível a ser abastecida em cada etapa, e o resultado mostrou uma economia de 1,7% quando comparado com o abastecimento mínimo necessário para a quantidade regulamentar. A partir deste estudo, aplicativos online podem ser desenvolvidos para facilitar a inserção dos dados necessários e simplificar os processos envolvidos no planejamento de voos.

ABSTRACT

Fuel expense accounts for the largest share of aviation operating cost, and lack of fuel or dry cargo is one of the main factors for aviation accidents. The present work aims to develop a nonlinear programming to obtain with tankering the minimization of the total cost, observing the flight rule, and the aircraft operational and physical restrictions. A simulation of four flights was carried out to find out the amount of fuel to be supplied at each stage, and the result showed a savings of 1.7% compared to the minimum necessary supply to the regulatory quantity. From this study, online applications can be developed to facilitate the insertion of the necessary data and simplify the involved processes of flight planning.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento contínuo de melhorias na segurança de voo é um dos principais objetivos buscados na aviação civil, por ter preocupações com a preservação da vida, mesmo com a existência de regulamentos para gestão de riscos e determinadas restrições financeiras. Um ambiente inseguro implica no aumento dos custos financeiros relacionado a acidentes, taxas legais, substituição de equipamentos, custos mais altos com seguros e o menor número de clientes, além do risco da perda de vidas (Stolzer, Halford e Goglia, 2015).

De acordo com Bala *et al.* (2014), os Sistemas de Gerenciamento da Segurança de Voo são baseados nas recomendações emitidas após a análise de acidentes passados. Para a aviação regular, o gerenciamento com o custo de combustível ocorreu por meio da implementação do conceito de *Flight Operations Quality Assurance (FOQA)* e o emprego de modelos de análise estatística para proporcionar aos gerentes informações de previsibilidade para auxílio à tomada de decisões. (Stolzer, 2002). Por outro lado, a aviação geral é carente em informações e de análise de dados, que permitiriam que esses operadores tomassem melhores decisões sobre o gerenciamento em geral, notadamente o de custos.

Sobre a gerência do voo, Orasanu, Martin e Davison (2009) demonstraram que fatores cognitivos levam a erro nas decisões táticas dos pilotos. Relatórios sobre acidentes e incidentes, que mostram a negligência de pilotos com a etapa de pré-voo. Esses autores listam como evidências, especificamente nessa fase inicial, o planejamento de voo mal definido e não verificado, a falta de precisão e o perigo do viés retrospectivo com as principais falhas de pilotos. Brasil (2016) diz que o piloto de uma aeronave (ACFT) é responsável por todas as fases desse planejamento, que inclui os estudos feitos por pilotos ou despachantes operacionais com informações sobre a rota pretendida, os aeroportos de origem, de destino e alternativo, a regra de voo, os auxílios à navegação, a meteorologia, a quantidade de pessoas a bordo, além das restrições físicas da ACFT, do abastecimento, do peso e do balanceamento da aeronave (Brasil, 2017).

A diferença no preço praticado pelas distribuidoras de combustível conduz à prática do chamado tanqueamento feito pelas empresas aéreas. O *Fuel Tankering, Economic Supply* ou *Fuel Management* consiste em abastecer uma quantidade maior de combustível mais barato em um aeroporto para gerar economia em escala (Fregnani, Müller e Correia, 2013). Para a Boeing (2004), o tanqueamento é a prática de carregar mais combustível no aeroporto de origem para reduzir a quantidade de reabastecimento naquele de destino. Como o conceito de tanqueamento não faz parte do plano de ensino dos cursos de pilotagem, além de, na prática geral, ser difícil a previsibilidade das rotas a serem feitas, aliado ao fato de que, em sua maioria, os pilotos recebem essa informação em curto prazo e para voos de ida e volta (Brasil, 1991), então, na aviação geral, não costumam colocá-lo em prática.

Nas ACFTs com esteira de turbulência média (acima de 7 ton e abaixo de 136 ton) e que normalmente operam com motores a reação, a prática de tanqueamento está atrelada ao peso do combustível, ou seja, quanto maior o peso atual, maior o consumo de combustível, e a otimização consistirá na solução relacionada a preço de combustível (na malha dos voos) x consumo x tanqueamento.

Como, na aviação geral, as ACFTs são, em geral, de esteira de turbulência leve, abaixo de 7 ton, geralmente com motor a pistão, em que o consumo de combustível é calculado por hora de voo, a otimização está associada ao abastecimento x peso x balanceamento, os dois últimos com limites de operação, como o Peso Máximo de Decolagem (PMD), Peso Máximo de Pouso (PMP) e Capacidade Máxima de Combustível, e os limites estruturais, como o da posição do Centro de Gravidade (CG) (Boyd, 2016).

Para Murata e Moriwaka (2017), principalmente na aviação geral, há um conflito entre segurança e economia, quando a supervisão por parte das agências reguladoras é menor em comparação com as empresas de transporte aéreo. Considerando que, na aviação, todos os custos são elevados, os operadores da aviação geral costumam diminuir os gastos com prevenção, operação e modernização e, conseqüentemente, reduzem os padrões de segurança de voo (Nichols, 1997).

Segundo Boyd (2016), na aviação geral os procedimentos semelhantes ao tanqueamento não são usualmente adotados devido ao nível de complexidade de cálculos. Por essa razão, para auxiliar os pilotos da aviação geral no processo de tomada de decisão sobre a prática de tanqueamento, o objetivo deste artigo é apresentar um modelo de programação não linear para minimizar o custo total com o abastecimento de uma ACFT, com base no planejamento de voo descrito no Código Brasileiro de Aeronáutica (BRASIL, 1986) e na legislação vigente para Regras do Ar no Brasil (BRASIL, 2013).

Um modelo de programação linear é resolvido com ferramentas usuais no mercado, como o LINGO, mas se deve considerar que, em modelos não lineares, determina-se um ótimo, geralmente local, porém não se garante que seja um ótimo global.

A literatura sobre pane seca encontra-se, principalmente, em recomendações resultantes de acidentes, porém poucos artigos analisam o trinômio do Sistema de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SIPAER): o Homem, o Meio e a Máquina. Este artigo aborda o tema, primeiro revisando causas e fatores que contribuem para a ocorrência de pane seca, seguindo-se a revisão das técnicas aplicadas para a gerência de combustível e a prática de tanqueamento, a especificação do modelo e sua aplicação em uma sequência de quatro voos e os resultados, finalizando com o contraste em relação aos valores de um abastecimento mínimo regular.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Praticagem do método de tanqueamento

Na aviação comercial, o gasto com o combustível representa a maior parcela do custo operacional (Fernandes, Alves e Oliveira, 2014). Segundo Fregnani (2007), 1% de economia de combustível tem impacto significativo no desempenho financeiro das empresas. A boa gestão dos departamentos de engenharia e de operação de uma empresa aérea acarreta redução no consumo de combustível (Fregnani, 2007). Stolzer (2002) diz que o *Flight Operations Quality Assurance* (FOQA) permitiu que os responsáveis por esses setores identificassem processos inovadores de conservação do combustível, desempenho de frota, operação de voo e garantia da qualidade por meio da aplicação de metodologias estatísticas a partir da sistemática coleta de dados de voos. Uma dessas inovações, responsável, em parte, pela economia do combustível, denomina-se tanqueamento (ou abastecimento econômico), prática estudada pela Pesquisa Operacional para determinar o ponto ótimo da quantidade de combustível a ser abastecido nos aviões para reduzir os custos totais numa sequência de voos (TAM, 2008). Entretanto, de acordo com Fregnani (2007), a estimativa do potencial de economia varia conforme o nível de sofisticação e controle das informações e do FOQA que as empresas aéreas estão dispostas a ter para o planejamento de voo,

Teixeira (2006) fez uso da programação linear com restrições quantitativas e qualitativas, obtidas nos Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) nos manuais de manutenção e nos documentos do *Full Authority Digital Engine Control* (FADEC), para obter uma solução que reduzisse o consumo em cada fase do voo. Além da economia em escala obtida com o tanqueamento, o autor ressalta que o principal ganho foi com a segurança de voo, e que o armazenamento de informações seguindo o conceito do FOQA permitiu melhores tomadas de decisão nas suas operações.

Boeing (2004) define a prática de tanqueamento como a maximização do peso de pouso com o adicional de combustível não usado a partir da oportunidade de economia com o preço do combustível. Para ela, a reserva de combustível depende de regulamentação mínima, escolha

do aeroporto de origem, reelaboração do plano de voo, políticas de reservas da companhia e combustível discricionário, e os motivos para essa prática são os seguintes: diminuir o tempo em solo, limitar a quantidade de combustível no aeroporto, aumentar a qualidade do combustível no destino e lucrar com a diferença no preço. A *Federal Aviation Administration* (FAA, 2011), agência norte-americana, recomenda a prática de tanqueamento para aeroportos com risco do desabastecimento de combustível, considerados especiais.

Singh e Sharma (2015) fizeram uma revisão sistemática da literatura com publicações de 1973 até 2014, em que identificaram 98 variáveis de decisão que contribuem para a otimização do consumo de combustível, sendo a prática de tanqueamento uma dessas. Os métodos utilizados para otimizar esse consumo foram programação linear, programação inteira mista, programação dinâmica, *gradiente based algorithms*, *simulation modelling* e *nature based algorithms*.

Boeing (2004) descreve que os métodos para o tanqueamento são o *Break-Even Price Ratio*, o qual considera que o preço do combustível no destino é maior e então verifica se o custo de consumir mais combustível ao levar mais peso é compensado, e o *Relative Cost to Tanker*, que considera somente a diferença entre os preços do combustível. No primeiro método, Boeing (2007) recomenda a otimização por meio do *Cost Index*, o custo por hora de operação dividido pelo custo do combustível. Esse Index é utilizado como entrada no *Flight Management Computer* para que os pilotos aloquem ao motor o desempenho requerido, conforme as condições operacionais, que influenciam no consumo do combustível.

Stroup e Wollmer (1992), Fregnani, Müller e Correia (2013) e Filippone (2015) utilizaram da programação linear para desenvolverem o modelo *Break-Even Price Ratio Method* aplicado para uma linha aérea doméstica com voos diários e sequenciais com o objetivo de minimizar o custo total de operação de cada aeronave a partir da quantidade de combustível a ser usado para abastecimento em cada aeroporto. Para isso, incluíram restrições físicas, operacionais e regulamentares em programação linear para aeronaves com motor à reação, turbo-jato e turbo-fun. A economia resultante foi de 5%, 3,24% e 7,4%, respectivamente, e em relação ao abastecimento mínimo regulamentar.

2.2. Fatores contribuintes para a ocorrência de pane seca na aviação geral

A aviação é marcada por riscos, avaliados em termos de probabilidade e severidade das consequências de um perigo na pior situação prevista (FAA, 2006), elementos intrínsecos ao ambiente de trabalho, experimentados por todos, em diferentes níveis de acordo com cada profissão (Fiacco et. al, 2015).

Quando o risco é perceptível, há a necessidade dos envolvidos reconhecerem a presença dos fatores contribuintes para os bloquearem e, assim, reduzirem a vulnerabilidade de um processo, sob pena de desencadear um acidente (Areosa, 2012). A frequente exposição a certas situações de risco afeta a capacidade do envolvido em identificar sua existência e mensurar a gravidade de suas consequências (Ross e Bazargan, 2004).

Em 29 de novembro de 2016, num voo fretado pela equipe brasileira Associação Chapecoense de Futebol, do aeroporto internacional Viru Viru em Santa Cruz de la Sierra, na Bolívia, para o José Maria Córdoba, na Colômbia, a ACFT AVRO 146 da empresa aérea LaMIA, ficou sem combustível e caiu a 10 milhas náuticas (nm) da cabeceira 01 do aeroporto. Dos 77 passageiros e tripulantes a bordo, 71 morreram. Destaca-se entre os fatores contribuintes para a queda a falta de responsabilidade dos funcionários da empresa em relação às regras de navegação do ar no momento do planejamento do voo (GRIAA, 2017). Essa empresa, na época desse acidente,

estava em recuperação judicial. O piloto em comando, que era um dos sócios, decidiu não realizar a parada necessária para o reabastecimento (GRIAA, 2017) para economizar combustível.

Cintra e Machado (2016) ressaltam que, na aviação geral, os pilotos são mais sensíveis às pressões econômicas e, por consequência disso, são mais propensos a cederem para operarem em condições adversas de manutenção ou de meteorologia, e com economia no abastecimento da aeronave ou negligência em relação ao estado de estresse e/ou de cansaço dos pilotos. Esses autores, em uma pesquisa, atestaram que 88% dos pilotos entrevistados já sofreram pressão patronal, bem como observaram que a palavra “patrão” teve a maior frequência (48), seguida de outros fatores: “meteorologia” (46), “horário” (23), “perder o emprego” (23), “segurança” (17), “pressão” (13), “ameaça” (12), “manutenção” (12), “outro piloto faz” (11), “acidente” (8), “estresse” (8), “insegurança” (8), “necessidade” (8), “combustível” (7), “instabilidade econômica” (6). “salário” (5) e “erro” (5). Os autores concluem que se faz necessária não apenas a conscientização dos proprietários das aeronaves da aviação geral sobre a segurança operacional, mas também a dos pilotos sobre seus deveres perante às normas internacionais e direitos conforme o Código Brasileiro de Aeronáutica.

Os pilotos e operadores de aeronaves, em suas responsabilidades com relação à segurança de voo, devem observar os mínimos regulamentares do abastecimento de combustível, tendo como variável as particularidades da navegação e as regras de voo (Brasil, 1986, 2013).

Ducut (2011) apresenta um modelo de investigação de acidentes baseado em camadas de Organização, Supervisão, Condições e Atos Inseguros e, quando todas essas camadas são quebradas, ocorre um acidente. Nas empresas aéreas do transporte aéreo, a estrutura organizacional exigida pelas agências reguladoras incluiu os funcionários na responsabilidade pela segurança de voo, sendo o presidente da empresa o principal responsável. Entretanto, na aviação geral, todas essas camadas são acumuladas em uma só pessoa, geralmente, o comandante, solitário nessa função de extrema responsabilidade de também gerenciar as tarefas inerentes ao voo.

Boyd (2015) utilizou a regressão logística para identificar os fatores que levaram a acidentes na aviação geral norte-americana, com aeronaves bimotoras, de 2002 até 2012. O autor utilizou uma análise dos parâmetros relacionados à demografia, à experiência e à certificação dos pilotos, bem como às características da ACFT, às condições meteorológicas, ao período do dia e à distância voada antes do acidente. Como resultado, Boyd (2015) observou que 14,4% de 229 acidentes não fatais ocorreram por falta de combustível, combustível contaminado ou falta de gerenciamento com a seletora de combustível, motivos dos 19,2% de 249 acidentes fatais. A maioria dos acidentes ocorreu com pilotos na faixa etária de 40 a 59 anos, com licença de piloto comercial, habilitação de voo por instrumento (IFR). Além disso, estes mesmos voavam sozinhos entre 2500-3999 horas de voo, entre 250-499 horas na ACFT onde ocorreu o acidente, no período do pôr-do-sol, entre 300 e 500 milhas voadas após a decolagem, e aeronave certificada de peso máximo de decolagem entre 1800-2267 kg.

No Brasil, o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), confirmou que de 2008-2017 ocorreram 1187 acidentes, dos quais 5,31% ocorreram por pane seca, causada pelos seguintes fatores: mau julgamento de pilotagem, o planejamento de voo mal definido, e negligência quanto à manutenção da aeronave, à atenção, à atitude, ao estado físico do piloto, ao correto processo decisório, à aplicação de comandos obrigatórios, à cultura organizacional, à formação, à capacitação, ao treinamento, à instrução, à motivação e à percepção das pessoas. que incluem o planejamento gerencial e pouca experiência do piloto (CENIPA, 2018).

3. MODELAGEM

Trata-se de um problema de minimização do custo de combustível de aviação (AVGAS) a ser usado para abastecimento em cada aeroporto, considerando o método *Relative Cost to Tanker* (Boeing, 2004) e suas restrições físicas e operacionais, bem como o cálculo de navegação aérea. O restante desta seção está organizado como segue: em 3.1 encontra-se a especificação do modelo, onde são apresentados os índices, os parâmetros de entrada e as variáveis de decisão e, em 3.2, a função objetivo e as restrições físicas e operacionais.

3.1. Especificação do Modelo

As variáveis são apresentadas na Tabela 1, sendo que $\forall_i = 1,2,3,\dots,m$, e $\forall_j = 2,3,\dots,n$, refere-se à ordem dos aeroportos, no qual o $i = 1$ é o primeiro aeroporto de origem e $j = 2$ é o primeiro aeroporto de destino. Para a próxima etapa, tem-se que $i = 2$ para o aeroporto de origem e $j = 3$ para o aeroporto de destino, e assim por diante.

Tabela 1 – Índices, parâmetros de entrada e variáveis de decisão

Variáveis	Índices
i	Aeroporto de origem $i = 1,2,\dots, l$
j	Aeroporto de destino $i = 1,2,\dots, J$
k	Aeroporto alternativo $k = 1,2,\dots, K$
L	Trecho de voo $L=1,2,3$ ($L=1$: subida; $L=2$: cruzeiro; $L=3$: descida)
R	Latitude ($R=1$); longitude ($R=2$)
m(y)	limite máximo operacional de massa da variável y (kg)
d(y)	distância entre o ponto de massa da variável y até o centro de pressão da ACFT (m)
Parâmetros de entrada (fixados)	
C_i	custo do AVGAS por kg no local i (densidade do combustível: 0,7 kg/L)
PDT	peso disponível total (kg)
PBD_{ij}	peso da bagagem dianteira de i a j (kg)
PBT_{ij}	peso da bagagem traseira de i a j (kg)
PPD_{ij}	peso do passageiro dianteiro de i a j (kg)
PPC_{ij}	peso do passageiro na parte central de i a j (kg)
PPT_{ij}	peso do passageiro traseiro de i a j (kg)
PBV	peso básico vazio (kg)
PMD	peso máximo de decolagem (kg)
PMP	peso máximo de pouso (kg)
CTC	capacidade do tanque de combustível (kg)
H_i	altitude do aeroporto i (pés)
H_j	Altitude do aeroporto j (pés)
VI_{ij}	Altitude de cruzeiro voando de de i a j (pés)
VL_{ij}	velocidade indicada por trecho e por etapa de voo (kt); $l = 1$ ou 3
G_{ir}	graus da latitude/longitude do aeroporto i (grau)
MIN_{ir}	minutos da latitude/longitude do aeroporto i (min)
SEG_{ir}	segundos da latitude/longitude do aeroporto i (s)
G_{jr}	graus de latitude/longitude do aeroporto j (grau)
MIN_{jr}	minutos da latitude/longitude do aeroporto j (min)
SEG_{jr}	segundos da latitude/longitude do aeroporto j (s)
Parâmetros intermediários (dependentes dos parâmetros de entrada)	
A_{ij}	consumo de combustível do aeroporto i ao j (kg)
A_{ijl}	consumo de combustível no trecho L quando vai de i à j (kg)
t_{ijl}	tempo de trecho l indo de i à j (hr)
VA_{ijl}	velocidade aerodinâmica do trecho l indo de i à j (kt); nesse caso, $l = 1$ ou 3
D_{ij}	distância do aeroporto i ao aeroporto j (nm)
C_{ik}	consumo de combustível de aeroporto i ao aeroporto alternativo k (kg)
GRAUTOTir	Latitude/longitude do aeroporto i em graus (grau)
Variáveis de decisão	
Z	custo total do combustível (R\$)
X_{ij}	quantidade de combustível necessário para abastecer no aeroporto i (kg)
CG_{ij}	centro de gravidade da aeronave em terra no aeroporto i quando vai até o aeroporto j (m)

3.2. Função objetivo e restrições

A função objetivo é a minimização do custo com o combustível durante os voos, igual à soma-produto do custo de combustível no aeroporto de origem com a quantidade de combustível para ir do aeroporto de origem para o de destino.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^n C_i * X_{ij} \quad (1)$$

3.1.1. Restrições físicas

As restrições associadas aos pesos máximos da aeronave (físicas) são as expressões de 2 a 8.

- Peso máximo de decolagem (PMD):

$$\text{PMD} \geq X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{i-1,j-1} - A_{i-1,j-1}) + \text{PBD}_{ij} + \text{PBT}_{ij} + \text{PPD}_{ij} + \text{PPC}_{ij} + \text{PPT}_{ij} + \text{PBV} \quad (2)$$

- Restrição do peso de passageiros dianteiro (PPD):

$$\text{PPD}_{ij} \leq m(\text{PPD}) \quad (3)$$

- Restrição do peso de passageiros na parte central (PPC):

$$\text{PPC}_{ij} \leq m(\text{PPC}) \quad (4)$$

- Restrição do peso de passageiros traseiro (PPT):

$$\text{PPT}_{ij} \leq m(\text{PPT}) \quad (5)$$

- Restrição do peso de bagagem dianteiro (PBD):

$$\text{PBD}_{ij} \leq m(\text{PBD}) \quad (6)$$

- Restrição do peso básico traseiro (PBT):

$$\text{PBT}_{ij} \leq m(\text{PBT}) \quad (7)$$

- Peso máximo para pouso (PMP):

$$X_{ij} - A_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij}) + \text{PBD}_{ij} + \text{PBT}_{ij} + \text{PPD}_{ij} + \text{PPC}_{ij} + \text{PPT}_{ij} + \text{PBV} \leq \text{PMP} \quad (8)$$

- Capacidade do tanque de combustível (CTC):

$$X_{ij} \leq \text{CTC} \quad (9)$$

- Cálculo do centro de gravidade

O cálculo do centro de gravidade (CG) considerada a disposição dos passageiros, das cargas e do peso do combustível multiplicado pela distância dos mesmos em relação ao centro de pressão (CP) da aeronave (linha datum), o resultado denominado momento. A distância do CP até o CG é chamada de braço.

Para o cálculo do CG da primeira etapa de voo, é considerado que o tanque de combustível está vazio, conforme a expressão 10.

$$\begin{aligned} & (\text{PBV} * d(\text{PBV}) + \text{PPD}_{ij} * d(\text{PPD}) + \text{PPC}_{ij} * d(\text{PPC}) + \text{PPT}_{ij} * d(\text{PPT}) \\ & + \text{PBD}_{ij} * d(\text{PBD}) + \text{PBT}_{ij} * d(\text{PBT}) + X_{ij} * d(X_{ij})) / (\text{PBV} + \text{PPD}_{12} + \text{PPC}_{12} + \text{PPT}_{12} + \text{PBD}_{12} + \text{PBT}_{12} + X_{12}) = \text{CG}_{ij} \end{aligned} \quad (10)$$

Para o cálculo do CG com combustível remanescente, é considerada a expressão 11.

$$\begin{aligned} & [\text{PBV} * d(\text{PBV}) + \text{PPD}_{ij} * d(\text{PPD}) + \text{PPC}_{ij} * d(\text{PPC}) + \text{PPT}_{ij} * d(\text{PPT}) + \text{PBD}_{ij} * \\ & d(\text{PBD}) + \text{PBT}_{ij} * d(\text{PBT}) + (X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij})) * d(X_{ij})] / \\ & (\text{PBV} + \text{PPD}_{ij} + \text{PPC}_{ij} + \text{PPT}_{ij} + \text{PBD}_{ij} + \text{PBT}_{ij} + X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij})) = \text{CG}_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

em que $\forall i = 1,2,3,\dots,m, \forall j = 2,3,\dots,n$

Os pilotos denominam o mapa de posição do CG das aeronaves como “envelope de voo”, porque é um gráfico no qual os limites da aeronave restringem a operação e visualmente é similar a um envelope de carta com a aba de fixação aberta. Como o momento (kgf x m) pelo total da massa (kg) da aeronave define se há condições de voo, o centro de gravidade deve estar dentro dos limites desse envelope em que no eixo X é colocado o braço e no eixo Y o total da massa (kg).

3.1.2. Restrições operacionais

São listadas como restrições operacionais os cálculos do *payload*, de combustível por regra de voo e de navegação aérea.

3.1.2.1. Cálculos de navegação aérea

- Latitude/longitude do aeroporto i

$$GRAUTOTir = - [(Gir + MINir / 60) + (SEGir / 3600)] \text{ para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } r = 1,2 \quad (12)$$

- Latitude/longitude do aeroporto j

$$GRAUTOTir = [(Gir + MINir / 60) + (SEGir / 3600)] \text{ para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } r = 1,2 \quad (13)$$

para i = 1,2,3,\dots,m e r = 1,2

- Distância do aeroporto i ao aeroporto j

$$Dij = 6371 * arccos * \{[(\cos(\pi * (90 - GRAUTOTj1) / 180 * \cos((90 - GRAUTOTi1) * \pi / 180))] + \text{sen} * \{[(90 - GRAUTOTj1) * \pi / 180] * \text{sen}[(90 - GRAUTOTi1) * \pi / 180] * \cos * [(GRAUTOTi2 - GRAUTOTj2) * \pi / 180]\} / 1,852 \quad (14)$$

para i = 1,2,3,\dots,m e j = 1,2,3,\dots,n

- Velocidade aerodinâmica por etapa do voo

$$Aijl = VIijl + 2 * \{[(Hij + Hi) / 2 - Hi] / 1000\} \quad (15)$$

para i = 1,2,3,\dots,m e j = 1,2,3,\dots,n

- Tempo de subida ou descida

$$Tijl = (Hij - Hi) / Rijl \quad (16)$$

para i = 1,2,3,\dots,m, j = 1,2,3,\dots,n e l = 1 ou 3.

- Tempo de voo ($Tij2$)

$$Dij - VAij1 * Tij1 + VAij3 * Tij3 = VAijl * Tij2 \quad (17)$$

para i = 1,2,3,\dots,m, j = 1,2,3,\dots,n

- Tempo de voo

$$Tij = Tij1 + Tij2 + Tij3 \quad (18)$$

para i = 1,2,3,\dots,m, j = 1,2,3,\dots,n

- Consumo de combustível por etapa de voo

$$Aijl = CCijl * Tijl \quad (19)$$

para i = 1,2,3,\dots,m, j = 1,2,3,\dots,n e l = 1 ou 3.

- Consumo de combustível durante o voo

$$Aij = Aij1 + Aij2 + Aij3 \quad (20)$$

para i = 1,2,3,\dots,m e j = 1,2,3,\dots,n

3.1.2.2. Restrições para cálculo de combustível dado as regras de voo

Para a navegação aérea o cálculo do tempo é considerado em minutos.

Restrições por regra de voo:

- Voo visual diurno

$$A_{ij} = A_{ij1} + A_{ij2} + A_{ij3}$$

$$\text{para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } j = 1,2,3,\dots,n \quad (21)$$

em que: $X_{12} \geq A_{12} + 30 \text{ min de autonomia}$

$$X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij}) \geq A_{ij} + 30 \text{ min}$$

$$\forall i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } \forall j = 2,3,\dots,n$$

- Voo visual noturno

$$A_{ij} = A_{ij1} + A_{ij2} + A_{ij3}$$

$$\text{para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } j = 1,2,3,\dots,n \quad (22)$$

em que: $X_{12} \geq A_{12} + 45 \text{ min de autonomia}$

$$X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij}) \geq A_{ij} + 45 \text{ min}$$

$$\forall i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } \forall j = 2,3,\dots,n$$

- Voo por instrumentos

$$A_{ij} = A_{ij1} + A_{ij2} + A_{ij3}$$

$$\text{para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } j = 1,2,3,\dots,n \quad (23)$$

em que: $X_{ij} \geq A_{ij} + C_i + 45 \text{ min de autonomia voando à 1500 pés}$

$$X_{ij} + \sum_{i=1,2,3,\dots,i-1}^{i-1} \sum_{j=2,3,4,\dots,j-1}^{j-1} (X_{ij} - A_{ij}) \geq A_{ij} + C_{ik} + 45 \text{ min a 1500 pés}$$

3.1.2.3. Cálculo do peso da carga paga (Payload)

$$\text{Payload}_{ij} = PDT - X_{ij} - \text{PPD}_{ij} - \text{PPC}_{ij} - \text{PPT}_{ij}$$

$$\text{para } i = 1,2,3,\dots,m \text{ e } j = 1,2,3,\dots,n \quad (24)$$

O modelo foi resolvido por programação não-linear com o auxílio do software de otimização LINGO 16.0 x64 da LINDO SYSTEMS INC.™. Todas as variáveis físicas e operacionais apresentadas neste modelo podem ser encontradas nos manuais de operações das aeronaves e as restrições de cálculo de navegação aérea nos sítios na internet ou nas estações presenciais que provêm o chamado Serviço de Informação Aeronáutica.

4. ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a aplicação do modelo foi feito o planejamento de quatro voos com o objetivo de minimizar o custo de combustível a ser abastecido, tendo em vista que o preço unitário do livro de AVGAS de aviação varia em cada aeroporto. A subseção 4.1 descreve os dados da aeronave, A subseção 4.2, os dados do voo, e a última subseção apresenta os resultados.

4.1. Dados da aeronave

A aeronave Sêneca III, da fabricante americana *Piper Aircraft Corporation*, foi a escolhida para o estudo de caso deste artigo, porque é o modelo com a maior soma de ocorrências de acidentes no Brasil. De 2008 até 2017, foram 256 incidentes, 56 incidentes graves e 79 acidentes (CENIPA, 2017). Essa aeronave também está dentro da faixa de peso descrita por Boyd (2015) com o maior percentual de acidentes na aviação geral nos Estados Unidos. Segundo a ANAC (2018), até dezembro de 2017 estavam cadastrados no Registro Aeronáutico Brasileiro 383 aeronaves desse modelo, sendo 21 para algum dos serviços aéreos especializado, 43 para instrução e 312 para fins particulares. A aeronave tem dois motores, com hélices giradas a pistão, com capacidade para 5 passageiros e um tripulante. O primeiro modelo construído foi em 1967, e até dezembro de 2017 essa aeronave continuava sendo fabricada.

Os valores de entradas do modelo estão das Tabela 2 e 3. A Tabela 2 apresenta as restrições físicas, e a Tabela 3 mostra os parâmetros de consumo para o cálculo de navegação aérea.

Tabela 2 – Restrições físicas para a aeronave Sêneca III

Restrições	Valores (kg)	Restrições	Valores (m)
PMD	2151,75	m(PBD)	45,30
m(PPD)	150,00	m(PBT)	45,30
m(PPC)	150,00	PMP	2044,38
m(PPT)	150,00	PDT	689,92
m(PBV)	1461,83	d(PBV)	2,210
d(PPD)	2,170	d(PPT)	4,000
d(PPD)	2,170	d(PBD)	0,570
d(PBT)	4,540	CG.Max	2,403
d(X _{ij})	2,410	CG.Min	2,083
CTC	253,44		

Tabela 3 – Parâmetros para o cálculo de consumo por etapa do voo na aeronave Sêneca III

Sigla	Consumo	Sigla	Consumo
CC _{ij1}	66,24 kg/hr	R _{ij3}	300,00 pés/min
CC _{ij2}	50,40 kg/hr	VI _{ij1}	92,00 kt
CC _{ij3}	36,00 kg/hr	VI _{ij2}	149,00 kt
R _{ij1}	650,00 pés/min	VI _{ij3}	130,00 kt

Para a plotagem do ponto do CG, são consideradas condições de temperatura e de pressão nos padrões da atmosfera (ISA). Por não ter sido encontrado um arquivo digital do envelope com as delimitações do fabricante, foram então calculados os limites por estimacão, com a aproximação de 13 retas, baseado no desenho obtido em *Piper Aircraft Corporation* (1981, p. 176). A figura com o envelope e a programação não linear dos limites do envelope pode ser encontrada no seguinte endereço:

<https://1drv.ms/x/s!Aq-SXdYOGIHChY5hI1uFOsytUXdrYg?e=FjHKe1>

4.2. Dados dos voos

O primeiro voo é o do aeroporto de Goiânia (SBGO) para o aeroporto de Ribeirão Preto (SBRP). O segundo é do SBRP para o aeroporto de Londrina (SBLO), seguido de Florianópolis (SBFL) e, por último, de SBFL para o aeroporto de Pelotas (SBPK). Na regra de voos por instrumentos para esse tipo de aeronave e pertencente a aviação geral, é exigido combustível regulamentar para navegar a distância do aeroporto de partida ao aeroporto de alternativa e mais 45 minutos de voo em velocidade de cruzeiro (Brasil, 2016). Os aeroportos alternativos para cada voo são, respectivamente, Bauru (SBBU), Maringá (SBMG), Navegantes (SBNF) e Bagé (SBBG). Foi considerada a regra de voo por instrumentos, sem restrições de espaço aéreo condicionado ou algum outro aviso ao navegante. Mas não as informações meteorológicas.

A Tabela 4 apresenta os valores de cada altitude dos aeroportos de origem, destino e alternativa, e o nível de voo para cada etapa.

Tabela 4 – Altitude dos aeroportos e níveis de voos

Etapas	Nível de Voo	AD _i	H _i (ft)	AD _j	H _j (ft)	AD _k	H _k (ft)	Nível de Voo
H ₁₂	FL 090	SBGO	2450	SBRP	1806	SBBU	2025	FL 060
H ₂₃	FL 080	SBRP	1806	SBLO	1867	SBMG	1877	FL 060
H ₃₄	FL 070	SBLO	1867	SBFL	19	SBNF	18	FL 060
H ₄₅	FL 070	SBFL	19	SBPK	59	SBBG	600	FL 060

As coordenadas geográficas dos aeroportos e dos auxílios à navegação aérea são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Altitude dos aeroportos e níveis de voos

Coordenadas	Latitude				Longitude			
	Hora	Min.	Seg.	Grau	Hora	Min.	Seg.	Grau
SBGO	16	37	47	-16,6297222	49	13	36	-49,2266667
SBRP	21	8	11	-21,1363889	47	46	36	-47,7766667
SBBU	22	20	37	-22,3436111	49	3	14	-49,0538889
SBLO	23	19	49	-23,3302778	51	8	12	-51,1366667
SBMG	23	28	46	-23,4794444	52	0	44	-52,0122222
SBFL	27	40	13	-27,6702778	48	33	9	-48,5525
SBNF	26	52	43	-26,8786111	48	39	3	-48,6508333
SBPK	31	42	58	-31,7161111	52	19	52	-52,3311111
SBBG	31	23	27	-31,3908333	54	6	35	-54,1097222
SEKLI	17	18	2	-17,3005556	49	5	3	-49,0841667
PAGAB	18	15	5	-18,2513889	48	53	51	-48,8975
PUMLA	18	34	36	-18,5766667	48	51	1	-48,8502778
AAQ	21	48	28	-21,8077778	48	8	27	-48,1408333
BRU	22	18	45	-22,3125	49	6	15	-49,1041667
JAVAN	23	51	30	-23,8583333	50	39	4	-50,6511111
ELOSA	25	0	39	-25,0108333	49	37	57	-49,6325
CTB	25	32	13	-25,5369444	49	9	48	-49,1633333
AGURI	27	8	17	-27,1380556	48	39	52	-48,6644444
PAJAM	28	6	31	-28,1086111	48	57	34	-48,9594444
NELOX	29	59	58	-29,9994444	51	9	44	-51,1622222
GENUS	30	34	45	-30,5791667	51	32	21	-51,5391667
EGAB	31	39	4	-31,6511111	52	42	62	-52,7172222

Os valores da Tabela 6 são encontrados por meio da expressão 14 para velocidade aerodinâmica, utilizada no cálculo de tempo para as etapas de voo. Considera-se $VI_{ij1} = 92$ kt, $VI_{ij2} = 149$ kt e $VI_{ij3} = 130$ kt.

Tabela 6 – Velocidades Aerodinâmicas (VA_{ij}) encontradas para os voos

Velocidades por Etapas	Valores (kt)	Velocidades por Etapas	Valores (kt)
VA_{121}	98,55	VA_{341}	97,13
VA_{122}	162,10	VA_{342}	159,26
VA_{123}	137,19	VA_{343}	136,98
VA_{671}	92,58	VA_{10111}	103,96
VA_{672}	156,10	VA_{10112}	160,96
VA_{673}	129,92	VA_{10113}	135,94
VA_{231}	98,19	VA_{451}	98,98
VA_{232}	161,38	VA_{452}	162,96
VA_{233}	130,39	VA_{453}	136,94
VA_{891}	92,30	VA_{12131}	103,88
VA_{892}	157,42	VA_{12132}	160,88
VA_{893}	130,63	VA_{12133}	143,20

O preço unitário do combustível por aeroporto é apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Valores do combustível por kg

Aeroporto	Abastecimento	Distribuidora de Combustível	Valor (R\$)*
SBGO	ABN ₁₂	BR AVIATION	4,327
SBRP	ABN ₂₃	BR AVIATION	4,572
SBLO	ABN ₃₄	BR AVIATION	3,816
SBFL	ABN ₄₅	BR AVIATION	4,140

Fonte: PETROBRAS (2016)

4.3. Resultados

O carimbo de voo é uma tabela utilizada para organizar os dados de navegação aérea e das restrições físicas da aeronave, sendo uma ferramenta que auxilia pilotos e despachantes operacionais em suas atividades de planejamento das operações. Os resultados intermediários, como cálculo do tempo de voo, velocidade aerodinâmica, peso zero combustível, peso de pouso e os demais estão contidos neste artigo. O arquivo com os carimbos das quatro etapas de voos pode ser acessado por meio do seguinte endereço:

<https://1drv.ms/x/s!Aq-SXdYOGIHChY5hI1uFOsytUXdrYg?e=FjHKe1>

Para preencher o carimbo e modelar a programação não linear aplicada neste artigo, utilizam-se as equações descritas na metodologia e os valores de inputs nas seções 4.1 e 4.2.

A Tabela 8 apresenta os valores referentes ao abastecimento regulamentar da aeronave e os compara com os resultados obtidos no processo de minimização do custo com o abastecimento em cada etapa.

A hipótese de que era esperado que houvesse um adicional de AVGAS de aviação a ser usado para abastecimento no aeroporto com o menor preço do produto é verdadeira. Em SBGO (X_{12}), o resultado da otimização apresentou que deve ser abastecido 15,573 kg a mais que o regulamentar ($X_{12}-ABN_{12}$). Com isso economizaria ($CTN_{23} - c_2 * X_{23}$) R\$ 71,20 no abastecimento em SBRP (X_{23}). Em SBLO (X_{34}), o resultado da otimização sugere o abastecimento de 7,6 kg a mais que o regulamentar. Na última etapa, com o combustível remanescente da última etapa, o resultado mostra que em SBFL (X_{45}) há uma economia de R\$ 58,73. Somando todos os custos com o abastecimento regular o resultado é de R\$ 1948,086, e com o abastecimento otimização por meio da prática de tanqueamento o total é de R\$ 1914,611, o que representa uma economia de R\$ 33,475 ou 1,78%. Esse valor em percentual está dentro dos valores de referência e que foram encontrados nas minimizações do custo total feitas por Stroup e Wollmer (1992), Fregnani, Müller e Correia (2013),

Tabela 8 - Comparação dos valores entre abastecimento regulamentar com a otimização

ABN ₁₂ (kg)	CTN ₁₂ (R\$)	REN ₁₂ (kg)	ABN ₂₃ (kg)	CTN ₂₃ (R\$)	REN ₂₃ (kg)	ABN ₃₄ (kg)	CTN ₃₄ (R\$)	REN ₃₄ (kg)	ABN ₄₅ (kg)	CTN ₄₅ (R\$)	Total (R\$)
166,282	719,535	74,679	69,514	317,818	61,363	111,722	426,331	64,795	114,956	484,402	1948,086
X_{12} (kg)	$C_1 * X_{12}$ (R\$)	$X_{12} - A_{12}$ (kg)	X_{23} (kg)	$C_2 * X_{23}$ (R\$)	$X_{23} - A_{23} + X_{12} - A_{12}$ (kg)	X_{34} (kg)	$C_3 * X_{34}$ (R\$)	$X_{34} - A_{34} + X_{23} - A_{23} + X_{12} - A_{12}$ (kg)	X_{45} (kg)	$C_4 * X_{45}$ (R\$)	Total (R\$)
181,855	786,923	90,252	53,940	246,618	61,363	119,341	455,404	78,734	101,017	425,665	1914,611

AB - Abastecimento; CT - Custo; RE - Remanescente; N - Normal.

A Figura 1 mostra os gráficos dos envelopes de voos. Todos os pontos de CG estão dentro dos limites estabelecidos, o que mostra que a programação não-linear minimizou o custo com combustível e obedeceu às restrições físicas da aeronave. As demais restrições também foram satisfeitas. No primeiro voo, o peso de decolagem ($PPC_{ij} + PPT_{ij} + PBV$) é de 2068,69 kg e braço de 2,35 m. No segundo voo, o peso de decolagem foi de 2034,91 e braço de 3,34. Na terceira etapa, o peso de decolagem foi de 2067,54 kg e braço de 2,35. E por último, o peso de decolagem foi de 2066,58 kg e braço de 2,35.

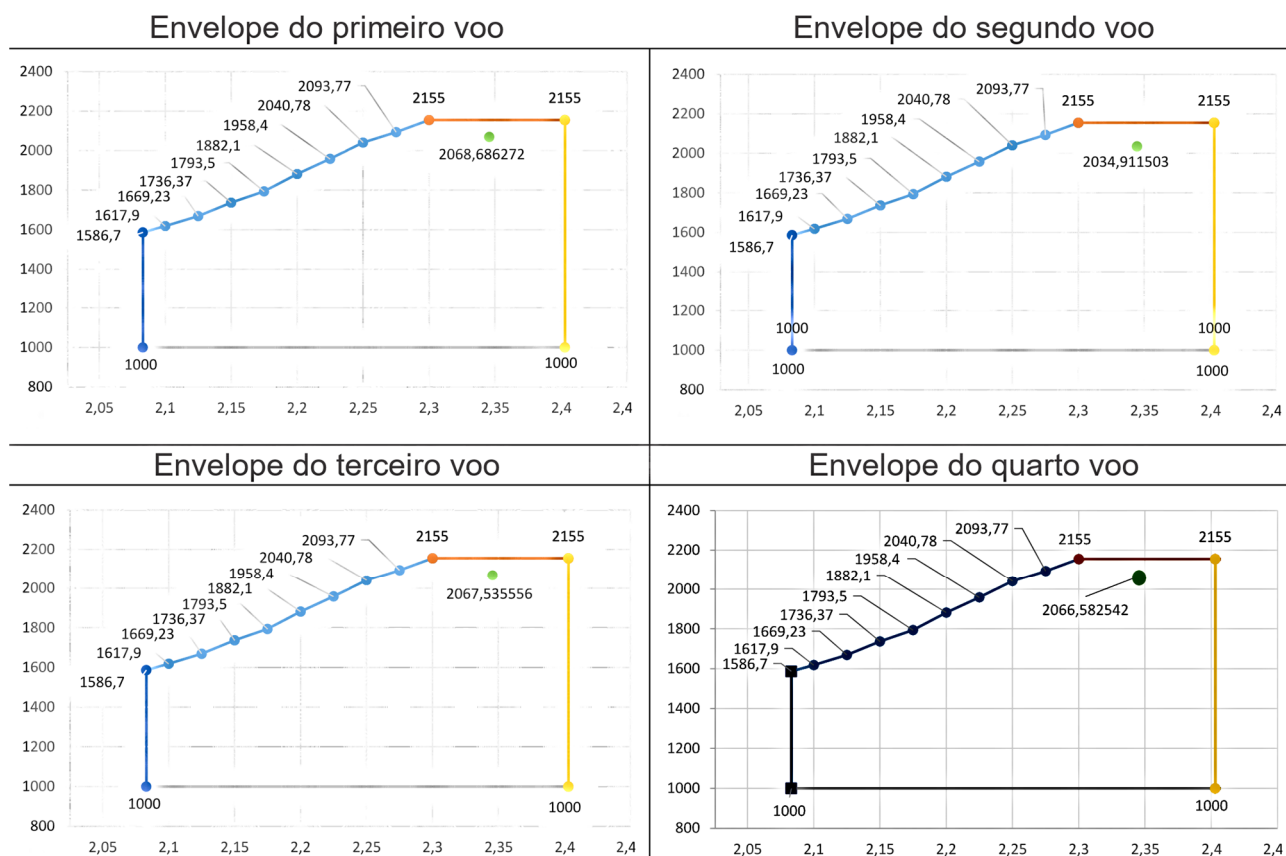


Figura 1. Envelopes das etapas de voos

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O gerenciamento da segurança operacional é apresentado às organizações na aviação como um conjunto de ferramentas e metodologias que visa aumentar a capacidade de compreender, construir e administrar sistemas proativos e reativos à operacionalidade das aeronaves. As atividades relacionadas à segurança de voo exigem a busca contínua pela mensuração de riscos e sua mitigação por meio de ferramentas que minimizem o erro humano. Acidentes relacionados com a pane seca e com o desvio comportamental do piloto no momento de planejamento do voo não deveriam acontecer, a própria regulamentação internacional sobre o abastecimento para cada regra de voo impõe limites mínimos com margens de segurança. Há outras camadas de proteção, como o plano de voo informado para o órgão de controle de tráfego aéreo, o qual precisa ser autorizado para que a aeronave adentre no espaço aéreo. A possibilidade de ocorrer outro acidente como do AVRO 146 da empresa aérea LaMIA pode ser reduzida com a aplicação de uma ferramenta acessível de cálculo de tanqueamento para a redução dos custos operacionais.

Por meio da programação não linear, foi obtido um método de minimização do custo de abastecimento ao observar as restrições físicas e operacionais da aeronave. Esse método foi aplicado numa sequência de quatro voos, com diferentes preços do combustível em cada aeroporto de origem e destino. O resultado foi uma economia total de 1,78% em relação se fosse abastecido o mínimo regulamentar para cada voo, similar aos encontrados na literatura.

As contribuições deste artigo são as seguintes: demonstrar que o método de tanqueamento também pode ser utilizada pela aviação geral, no qual as restrições físicas e operacionais são mais sensíveis do que na aviação regular. Outro é a revisão da literatura sobre os fatores segurança de voo.

contribuintes para a ocorrência de pane seca para ser um alerta para todos os responsáveis pela

As sugestões para trabalhos futuros são a inserção da otimização do consumo por nível de voo, a partir dos gabaritos de ajuste da mistura ar/combustível com a altitude, densidade e temperatura do ar. Para os fabricantes de aeronaves, que desenvolvam um sistema digital para abastecimento, peso e balanceamento de aeronave para a utilização dos pilotos, mesmo que a aeronave não esteja mais em fabricação. E modificações nos manuais operacionais devem ser feitos sendo necessária aprovação pela agência reguladora para que o operador pudesse utilizar esse aplicativo.

REFERÊNCIAS

- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. (2017). Requisitos para Concessão de Certificados Médicos Aeronáuticos. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil – RBAC n° 67. Emenda n° 01. Brasília. Disponível em: <<https://goo.gl/WTa6WW>>. Acessado em 11/06/2018.
- Areosa, J. (2007). As percepções de riscos dos trabalhadores: conhecimento ou literário. Colóquio Internacional de Segurança e Higiene Ocupacionais – SHO2007. Guimarães, Universidade do Minho, pp. 131-134
- Bala, I.; Sharma, S.K.; Kumar, S.; Shrivastava, R. (2014) Exploring Safety Aspects of Aviation Industry. ADVANCES IN AEROSPACE SCIENCE AND APPLICATIONS, v. 4, n.1, p.37-44.
- Brasil, (1986). Código Brasileiro de Aeronáutica. Lei n° 7.565, de 19 de dezembro de 1986. Brasília, Subchefia para Assuntos Jurídicos da Casa Civil.
- Brasil, (1991). Manual do Curso Piloto de Linha Aérea – Avião (PLA-A) - MMA 58-7. Portaria DGAC N° 207/DGAC, Departamento de Aviação Civil, 25 de jun. de 1991.
- Brasil, (2017). Plano de Voo. Instrução do Comando da Aeronáutica que aprova a reedição da ICA 100-11, que regulamenta o uso do “Plano de Voo”. Brasília, Comando da Aeronáutica.
- Brasil, (2016). Regras do Ar. Instrução do Comando da Aeronáutica que estabelece as “Regras do Ar”. Brasília, Comando da Aeronáutica.
- Boeing (2004). Fuel Conservation: Flight Operations Engineering. Boeing Commercial Airplanes. Disponível em <https://goo.gl/pEzV2m>. Acessado em 10/06/2018.
- Boeing (2007). Fuel Conservation Strategies: Cost Index Explained. Flight Operations. Disponível em <https://goo.gl/bxKYvA>. Acessado em 10/06/2018.
- Boyde, D.D. (2015). Causes and Risk Factors for Fatal Accidents in Non-commercial Twin Engine Piston General Aviation Aircraft. ACCIDENT ANALYSIS AND PREVENTION. v.77. p.113-119. DOI: 10.1016/j.aap.2015.01.021
- Boyde, D.D. (2016). GA Accidents related exceedance of airplane weight center of gravity limits. Elsevier. ACCIDENT ANALYSIS AND PREVENTION. v. 91. p.19-23. DOI: 10.1016/j.aap.2016.02.019
- CENIPA – Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Aviões – Sumário estatístico 2008 - 2017. Brasília, Força Aérea Brasileira, p.61. Disponível em: <<https://goo.gl/h6x6KE>>. Acessado em 11/06/2018.
- Cintra, N.M.; Machado, H.C. (2016). A Representação Social dos Aspectos Comportamentais e Legais na Aviação Geral. IX Simpósio de Segurança de Voo. Revista Conexão SIPAER – Revista Científica de Segurança de Voo, v.7, n.1, p. 4-13.
- Ducut, J. R. (2011). *Integrating Safety into Operations – A Systems-Thinking Approach*. Technical Guide. University of California Risk Summit 2011. Disponível em: <<http://ehs.ucr.edu/safety/systems>>. Acessado em 11/06/2018.
- FAA. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. (2006). Introduction to Safety Management Systems for Air Operators (AC 120-92). Washington: Ed. Government Printing Office. Disponível em <https://goo.gl/hJiucf>. Acessado em 10/06/2018.
- Fernandes, H. F., Alves, C. J. P., Oliveira, A. V. M. (2014). Estudo dos Efeitos de Aumentos no Custo do Combustível na Demanda por Transporte Aéreo Doméstico. TRANSPORTES, v.22, n. 3. DOI: 10.14295/transportes.v22i3.810
- Fiaco, R. M. D., Fonseca, B. C., Silva, R. B., Gois, T. C., Melo, L. S. B. (2015). Analysis of Occupational Risks in the Pilot Function: Applied to the Safety Management System. Anais do V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. APREPRO: Ponta Grossa. DOI: 10.13140/RG.2.1.3528.6643
- Filippone, A. (2015). Fuel Tankering: Is it worth it? Case of Study. Aero-AD-UNIMAN. v. 7.4.5, i.8.
- Fregnani, J. A. T. G. (2007). Um modelo para minimização dos custos totais de abastecimento considerando as múltiplas escalas das aeronaves nas rotas de uma empresa aérea brasileira. 2007. 363 f. Dissertação (Mestrado). Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos.
- Fregnani, J.A.T., Müller, C., Correia, A.R. (2013). A fuel tankering model applied to a domestic airline network. JOURNAL OF ADVANCED TRANSPORTATION. v.37, p.386-398. DOI: 10.1002/atr.6162
- Gabriel, T. M. L. (2009). Otimização da posição do centro de gravidade de um avião comercial para minimização do consumo de combustível. 42f. Dissertação (Mestrado). Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal.
- GRIAA – Grupo de Investigación de Accidentes. Informe Final Accidente. (2017). COL-16-37-GIA. Agotamento de Combustible AVRO 146-RJ85, Matrícula CP 2933, 29 de novembro de 2016. La Unión, Antioquia. Disponível em <https://goo.gl/fCxEbq>. Acessado em 11/06/2018.
- Lima, G.P.V.; Silva, T.A. (2016). Fatores Humanos no Gerenciamento da Segurança Operacional. Conexão SIPAER, REVISTA CIENTÍFICA DE SEGURANÇA DE VOO, v.7, n.1, p.13-24.

- Murata, A. Moriwaka, M. (2017). *Anomaly in Safety Management: Is it constantly possible to make safety compatible with economy?* Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 604, p. 45-54. DOI 10.1007/978-3-319-60525-8_6
- Orasanu, J., Martin, L., Davison, J. (2009). *Cognitive and Contextual Factors in Aviation Accidents: Decision Errors*. Chapter of the book: Linking Expertise and Naturalistic Decision Making. Psychology Press: Taylor & Francis Group, New York.
- Piper Aircraft Corporation (1981) Pilot's Operation Handbook. 1999 kg, SENECA III PA 34-220T. Disponível em http://www.rebay.at/fliegen/manuals/pa34_seneca_3_manual.pdf. Acessado em 25/04/2016.
- Ross, D. L., Bazargan, M. (2004) *A comparative risk measure for general aviation*. International Society on MCDM: Whistler.
- Stolzer, A.J. (2002). Fuel Consumption Modeling of a Transport Category Aircraft Using Flight Operations Quality Assurance Data: A literature review. JOURNAL OF AIR TRANSPORTATION, v. 7, n. 1, p. 93-102.
- Stolzer, A. J., Halford, C. D., Goglia, J. J. (2015). *Safety Management Systems in Aviation*. 2nd ed. United Kingdom: Ashgate Publishing.
- Stroup, J.S., Wollmer, R.D. (1992). A Fuel Management Model for the Airline Industry. OPERATIONS RESEARCH, v. 40, n. 2, p.229-237. DOI: <http://dx.doi.org/10.1287/opre.40.2.229>
- TAM. (2008). Manual Geral de Operações. v. 5. *Flight Standards*. São Paulo.