

Sazonalidade de indicadores de fadiga nas escalas de trabalho dos aeronautas da aviação regular brasileira

Seasonal variation in fatigue indicators
in Brazilian civil aviation crew rosters

Tulio Eduardo Rodrigues^{1,2}, Frida Marina Fischer³, Eduardo Morteo Bastos¹, Luciano Baia⁴, Raul Bocces¹, Fabiano Paes Gonçalves⁴, Paulo Rogério Licati⁵, Alfredo Menquini⁵, Paulo Spyer⁴, Eduardo Stefenon⁶, André Frazão Helene⁷

RESUMO | Introdução: Métodos de análise, compreensão e gerenciamento do risco da fadiga na aviação representam tópicos de interesse para a segurança de voo e mitigação de falhas humanas. **Objetivo:** Avaliar o provável nível de fadiga em uma amostra de conveniência de pilotos e comissários de voo da aviação regular brasileira, propondo metodologia e indicadores apropriados para a quantificação da potencial exposição ao risco da fadiga durante as fases críticas de voo (pousos e decolagens). **Métodos:** Os dados foram obtidos por envio espontâneo e anônimo das escalas de voo para uma plataforma, sendo estas analisadas com o *software* Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness / Fatigue Avoidance Scheduling Tool (SAFTE-FAST), que leva em conta o processo homeostático, os ritmos circadianos associados à atenção e vigília e a inércia do sono. **Resultados:** As escalas dos meses de janeiro (n=248), maio (n=259) e julho (n=261) de 2018 tiveram incidência de 77, 54 e 77% de ao menos um evento com efetividade mínima nas fases críticas abaixo de 77%, respectivamente. As distribuições de efetividades mínimas e áreas de risco nas fases críticas apresentaram oscilação sazonal significativa, comparando os meses de janeiro ou julho com maio de 2018 (p<0,001). **Conclusões:** O estudo apontou probabilidade relativa elevada de fadiga nas escalas dos aeronautas, assim como oscilações sazonais significativas nas distribuições de efetividade mínima e aérea de risco nas fases críticas. Esses resultados indicam a necessidade de um melhor gerenciamento das escalas, visto que os limites prescritivos vigentes à época não foram suficientes para a mitigação dos riscos.

Palavras-chave | fadiga; aviação; modelos biológicos; análise de risco.

ABSTRACT | Background: Analyzing, understanding and managing fatigue risk in aviation is relevant for flight safety and to reduce human error. **Objective:** To analyze probable levels of fatigue among a convenience sample of Brazilian civil aviation pilots and flight attendants and to develop appropriate methods and indicators to quantify potential fatigue risk in critical phases of flight (landings and takeoffs). **Methods:** Data were obtained from flight rosters voluntarily and anonymously fed to a digital platform. Rosters were analyzed with software SAFTE-FAST, which considers homeostatic process and circadian cycles related to attention and wakefulness and sleep inertia. **Results:** The rosters for January (n=248), May (n=259) and July (n=261) 2018 were associated with incidence of 77, 54 and 77% respectively of least one event of minimal effectiveness (<77%) during critical phases of flight. The distribution of minimal effectiveness and hazard area during critical phases of flight exhibited significant seasonal oscillation upon comparing the results for January and July relative to May 2018 (p<0.001). **Conclusion:** Relative likelihood of fatigue was high in the crew rosters, with significant seasonal oscillation of minimal effectiveness and hazard area in critical phases of flight. These results point to the need for improved roster management since prescriptive rules were insufficient to mitigate risk.

Keywords | fatigue; aviation; biological models; risk assessment.

¹Diretoria Técnica, Associação dos Aeronautas da Gol - São Paulo (SP), Brasil.

²Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

³Departamento de Saúde Ambiental, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

⁴Diretoria de Safety, Associação dos Tripulantes da LATAM - São Paulo (SP), Brasil.

⁵Diretoria Técnica, Associação Brasileira de Pilotos da Aviação Civil - São Paulo (SP), Brasil.

⁶Diretoria de Segurança de Voo, Sindicato Nacional dos Aeronautas - São Paulo (SP), Brasil.

⁷Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo - São Paulo (SP), Brasil.

DOI: 10.5327/Z1679443520200467

INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), a fadiga humana é definida como um estado fisiológico de capacidade física/mental reduzida resultante da privação de sono, vigília prolongada, fases dos ritmos circadianos associados à atenção, vigília e/ou carga de trabalho que pode prejudicar a capacidade de vigilância e a habilidade de operar com segurança uma aeronave ou desempenhar tarefas relacionadas à segurança operacional¹. A OACI preconiza em seu Anexo 6 que “o Estado do operador deverá estabelecer regulamentos com o objetivo de gerenciar a fadiga. Estes regulamentos devem ser baseados em princípios e conhecimentos científicos com o objetivo de assegurar que membros da tripulação estejam atuando com um nível adequado de alerta”¹. É, portanto, necessário que a fadiga seja adequadamente gerenciada com o intuito de prevenir acidentes ou incidentes graves na aviação causados por falhas humanas.

Para o caso específico brasileiro, foi sancionada em agosto de 2017 uma nova legislação, a Lei nº 13.475/17², que substituiu a antiga Lei do Aeronauta de 1984. Nessa atualização, ficou a cargo da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) regulamentar um sistema de gerenciamento de risco de fadiga humana baseado em normas e recomendações internacionais de aviação civil. Esse Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC 117) foi recentemente publicado³ e contém requisitos e flexibilizações em diversos limites prescritivos que extrapolam a própria Lei nº 13.475/17.

Outro aspecto relevante está relacionado à investigação de ocorrências aeronáuticas causadas por falhas humanas, nas quais a fadiga possa ter sido fator contribuinte⁴. No Brasil, a Comissão Nacional da Fadiga Humana (CNFH) recentemente publicou uma revisão de uma metodologia para auxiliar o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) na avaliação da fadiga como fator contribuinte nos acidentes e incidentes graves na aviação⁵. Adicionalmente, estudo recente mostrou que a análise da voz, fala e linguagem pode ser utilizada para a detecção de fadiga e sonolência em acidentes aeronáuticos causados por falha humana⁶. É recomendado, portanto, que estudos sejam realizados no intuito de fomentar o conhecimento sobre o tema, fornecendo, se possível, recomendações de segurança de maneira a auxiliar o setor aéreo no gerenciamento do risco da fadiga.

A importância do monitoramento da fadiga para a segurança aérea é necessária também por causa dos turnos irregulares

dos aeronautas⁷. Estudo realizado em uma grande empresa aérea brasileira⁸ mostrou que os erros de pilotos são 46% mais prováveis de ocorrer no período da madrugada (das 0 às 6h), quando comparados aos outros períodos do dia (das 6 às 12h, das 12 às 18h e das 18 às 24h). Outro estudo, feito em 2012, com pilotos da aviação civil brasileira, apontou evidências para um cenário de fadiga crônica⁹. A pesquisa incluiu a coleta de 301 relatos de fadiga que foram posteriormente avaliados por meio do modelo Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness / Fatigue Avoidance Scheduling Tool (SAFTE-FAST)¹⁰.

A utilização de modelos biomatemáticos para avaliar a fadiga na aviação tem sido objeto de interesse tanto da comunidade científica¹⁰⁻¹² quanto de órgãos reguladores¹³⁻¹⁵. De fato, a Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA) fez recentemente uma pesquisa de grande abrangência para analisar a eficácia de alguns limites prescritivos para a prevenção da fadiga¹⁵. Marqueze et al.¹⁶ em inquérito realizado com pilotos brasileiros mostrou prevalência de 57,8% para o cochilo não intencional a bordo. Esse dado revela que provavelmente os pilotos estavam com débito de sono e/ou fatigados.

O objetivo do presente trabalho foi propor uma abordagem inovadora para a análise do risco da fadiga nas operações aéreas, relacionando o valor de efetividade calculado pelo *software* SAFTE-FAST com a probabilidade relativa de acidentes causados por falhas humanas. Avaliou-se, indiretamente, o estado de alerta numa amostra de conveniência de tripulantes da aviação regular brasileira. Com base nesses dados, foram fornecidos indicadores que permitem quantificar a probabilidade relativa de fadiga e identificar tal efeito associado às variações sazonais.

MÉTODOS

AMOSTRA

Uma amostra de conveniência contou com 323 aeronautas da aviação regular brasileira, incluindo comandantes, copilotos e comissários de voo de ambos os sexos, sem distinção de idade e tempo de profissão. Os dados relativos às escalas de voo representam parte do banco de dados do chamado Projeto Fadigômetro (detalhes sobre o projeto estão disponíveis em <www.fadigometro.com.br>).

No presente artigo estão apresentados os resultados de jornadas de trabalho de voos de tripulações simples (dois pilotos e um número mínimo de comissários de voo para o

tipo de aeronave) efetuados em aeronaves de corredor único (*narrow-body*), não sendo incluídas na análise tripulações compostas (três pilotos e o número mínimo de comissários de voo para o tipo de aeronave acrescido de mais 25%) nem de revezamento (quatro pilotos e o número mínimo de comissários de voo para o tipo de aeronave acrescido de mais 50%).

ASPECTOS ÉTICOS

O presente estudo é parte do projeto de pesquisa *Análise dos riscos da fadiga humana na aviação civil brasileira*, que foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (Certificado de Apresentação para Apreciação Ética — CAAE: 89058318.7.0000.5464) do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Foi garantida confidencialidade dos participantes, que aderiram ao estudo de forma voluntária e espontânea por meio do aceite digital ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). O estudo não envolve interesses de ordem comercial ou laboral de nenhuma das entidades representativas envolvidas, tampouco de empresas aéreas ou órgão regulador do setor. Assegurou-se confidencialidade das empresas aéreas cujas escalas foram analisadas.

COLETA DE DADOS

Os voluntários que aceitaram participar do estudo preencheram um cadastro, cuja validação ocorreu por meio de um código enviado ao aeronauta via SMS. Com esse cadastro, todas as escalas executadas do aeronauta, desde dezembro de 2017, foram automaticamente enviadas ao sistema, que atribuiu um código indexador interno, sem interferência humana. Os aeronautas foram convidados também a preencher um questionário biopsicossocial contendo questões sobre características sociodemográficas, comportamentais e de saúde. Esses dados não serão abordados no presente artigo.

ANÁLISE DOS DADOS DAS ESCALAS DE VOO

As escalas dos aeronautas foram digitalizadas e interpretadas por um algoritmo interno de uma plataforma *web*. Foram inseridos filtros a fim de proporcionar a extração de arquivos em formato CSV com determinadas especificidades, tais como: tipo de aeronave, função a bordo, período de início e término de jornada, período de início e término de cada etapa de voo, código OACI dos aeroportos de decolagem e pouso, base contratual e atividade realizada pelo aeronauta. As atividades constantes das escalas são divididas em dois grupos, considerando os eventos de voo propriamente dito (*crewing* — C) e eventos de trabalho não relacionados ao voo (*working* — W).

Estes últimos incluem atividades de solo (reservas, treinamentos etc.) ou atividades de voo nas quais o tripulante está embarcado como extra a serviço, ou seja, viajando como passageiro para deslocar-se por determinação da empresa.

Neste artigo foram incluídos apenas os eventos de voo nas escalas dos tripulantes, desconsiderando-se os demais eventos não relacionados ao voo propriamente dito. Analisaram-se os dados com auxílio do programa Statistical Product and Service Solutions (SPSS), versão 20.0.0. As análises inferenciais aplicadas foram precedidas por avaliação de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) e seguidas por análises não paramétricas (teste de Kruskal-Wallis e de Mann-Whitney).

O SOFTWARE SAFTE-FAST

O *software* SAFTE-FAST baseia-se em um modelo biomatemático que faz a estimativa da efetividade (E_{SF}) do indivíduo ao longo das horas do dia, grandeza proporcional à velocidade para a realização correta de tarefas. O modelo leva em conta três componentes:

- o balanço homeostático;
- o ciclo circadiano associado à vigília e sonolência;
- a inércia do sono.

A Figura 1 descreve sucintamente a estrutura do modelo SAFTE-FAST¹⁰. O balanço do processo homeostático é descrito como um “reservatório de sono”¹⁰ que vai esvaziando-se ao longo das horas de vigília e preenchendo-se ao longo das horas de sono. A recuperação desse “reservatório”¹⁰ depende da intensidade, da duração e da qualidade do sono. A intensidade do sono é função do débito de sono acumulado e dos ritmos circadianos associados à vigília e à sonolência. Ou seja, quanto maiores forem o débito e a propensão ao sono, maior será a taxa de recuperação do “reservatório”¹⁰, e vice-versa. O terceiro componente do modelo busca reproduzir a degradação da *performance* cognitiva causada pela inércia do sono, fenômeno transitório relacionado ao período de tempo que um indivíduo leva para restabelecer o seu nível de alerta após acordar¹⁰.

PARÂMETROS, CRITÉRIOS DO SOFTWARE SAFTE-FAST E AJUSTE PROPOSTO

Para os parâmetros de sono do SAFTE-FAST, foram adotados os seguintes valores e critérios:

1. hora do início do sono às 23h;
2. mínimo de sono de 60 minutos;
3. máximo de oito/nove horas de sono em dias de trabalho/folga;

4. cochilos inseridos automaticamente antes das jornadas na madrugada;
5. duração máxima do cochilo de 210 minutos;
6. antecipação do horário de dormir caso o indivíduo tenha de despertar muito cedo pela manhã;
7. qualidade excelente de sono na residência ou no hotel.

Tais parâmetros refletem a configuração padrão do *software* SAFTE-FAST (versão 2.0.5.148), e os critérios 4 e 6 foram incluídos a fim de produzir resultados esperados para circunstâncias ideais nas rotinas de trabalho. Todos os parâmetros e critérios podem ser aprimorados por análises futuras do questionário biopsicossocial, assim como mediante a inclusão de medidas objetivas obtidas em actígrafos.

O SAFTE-FAST também leva em conta os períodos de tempo que envolvem a preparação para o trabalho (em casa ou no hotel) — considerada 60 minutos no presente estudo — e os deslocamentos nos trajetos casa–aeroporto, aeroporto–casa, hotel–aeroporto e aeroporto–hotel, todos apontados de 60 minutos cada um.

Dessa forma, a análise realizada levou em conta circunstâncias ideais nas rotinas de trabalho dos aeronautas, representando, portanto, limites superiores de desempenho cognitivo decorrentes da combinação de períodos de vigília (presentes ao longo das jornadas de trabalho), oportunidades de sono oriundas das rotinas de trabalho e hipóteses padronizadas do *software* SAFTE-FAST.

No presente estudo foi proposto um modelo que descrevesse a probabilidade relativa de acidentes causados por falhas

humanas (P_{FH}) como uma função inversa de E_{SF} , ou seja: $P_{FH}(E_{SF})=b/E_{SF}$, sendo b uma constante a ser determinada.

CLASSIFICAÇÃO DA PROBABILIDADE RELATIVA DE FADIGA EM FUNÇÃO DE E_{SF}

No Projeto Fadigômetro foram adotados três intervalos de E_{SF} para classificar a probabilidade relativa de fadiga nas operações aéreas:

- probabilidade baixa: $E_{SF}>90\%$;
- probabilidade moderada: $77\%<E_{SF}\leq 90\%$;
- probabilidade alta: $E_{SF}\leq 77\%$.

Tal parametrização baseia-se numa pesquisa que avaliou a relação entre E_{SF} e os impactos econômicos nos acidentes ferroviários¹⁷. No estudo citado, os autores verificaram que o custo total de acidentes causados por falha humana aumenta cerca de 4,5 vezes ao compararmos os resultados para $E_{SF}>90\%$ com $E_{SF}\leq 77\%$. Observaram também variação de 7% no custo total comparando o custo no intervalo $77\%<E_{SF}\leq 90\%$ com $E_{SF}>90\%$, caracterizando o intervalo entre 77 e 90% como um regime de transição. Embora esse estudo¹⁷ tenha sido utilizado para validar o *software* SAFTE-FAST, outros parâmetros que relacionem intervalos de efetividade e a probabilidade relativa de fadiga poderão ser adotados a critério de reguladores e empresas aéreas.

FASE CRÍTICA DE VOO, EFETIVIDADE E O CONCEITO DE ÁREA DE RISCO

De acordo com o *software* SAFTE-FAST, as fases críticas do voo ocorrem durante os primeiros e os últimos 30 minutos

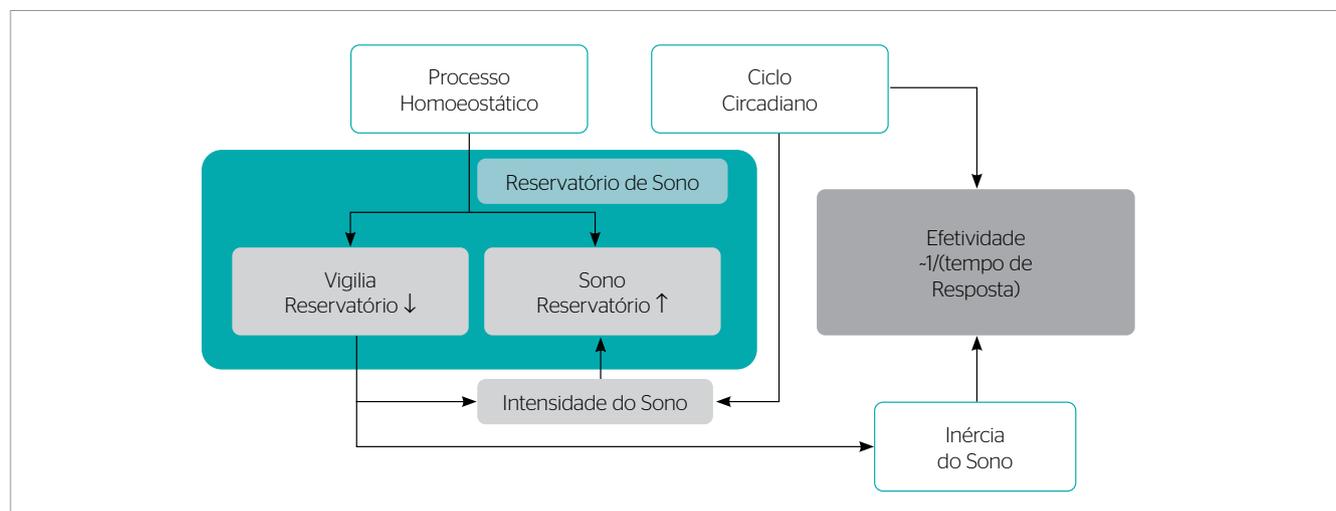


Figura 1. Versão esquemática do modelo biomatemático Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness / Fatigue Avoidance Scheduling Tool (SAFTE-FAST), adaptado de Hursh et al.¹⁰.

de cada etapa. Nessas fases estão geralmente incluídos a decolagem, a subida, a aproximação e o pouso, sendo caracterizadas pelo aumento da carga de trabalho mental que leva às maiores exigências cognitivas da tripulação, especialmente influenciáveis por fatores externos (meteorologia, tráfego aéreo, comunicação com os órgãos de controle, entre outros) e fatores internos (procedimentos operacionais, limitações da aeronave, comunicação dentro da cabine de comando, entre outros).

No intuito de avaliar a fadiga de forma global nas escalas de voo, foi definida uma grandeza extensiva que envolve o tempo de exposição ao risco durante as fases críticas. Essa grandeza, denominada no presente trabalho de área de risco, representa uma quantidade bidimensional que leva em conta o período de tempo (em minutos) que o indivíduo tem efetividade menor ou igual a 77% no *software* SAFTE-FAST na fase crítica, assim como quão abaixo desse limiar ficou sua efetividade. Ou seja, a área de risco representa a área da curva de efetividade abaixo de 77% durante as fases críticas de voo. Esse conceito de área de risco foi inicialmente proposto por Rangan e Van Dongen em 2013¹⁸, sendo no presente estudo aplicado com um limiar de 77% de E_{SF} e apenas nas fases críticas do voo.

RESULTADOS

RELAÇÃO ENTRE E_{SF} E A PROBABILIDADE RELATIVA DE ACIDENTES CAUSADOS POR FALHAS HUMANAS COM BASE NO AJUSTE ADOTADO

Para estabelecer relação entre efetividade e probabilidade relativa de acidentes causados por falhas humanas, foi construído um modelo que combinou dados objetivos de acidentes¹⁹ com resultados de efetividade obtidos no SAFTE-FAST. Numa primeira aproximação, pôde-se assumir que a probabilidade relativa de acidentes causados por falhas humanas é inversamente proporcional à efetividade calculada pelo *software* SAFTE-FAST, ou seja: $P_{FH}(E_{SF}) = b/E_{SF}$. Com isso, pretendeu-se estabelecer um único parâmetro (b) para relacionar P_{FH} e E_{SF} . Os dados utilizados para o ajuste foram obtidos em um experimento dedicado à validação do modelo SAFTE-FAST¹⁹, em que foram mapeados 400 acidentes causados por falha humana nas viagens de trem nos Estados Unidos. Os funcionários foram monitorados durante os 30 dias que antecederam o acidente, fato que possibilitou a utilização do modelo para estimar o valor de E_{SF} no momento do evento. Os resultados desse experimento são apresentados na Figura 2, juntamente

com um ajuste da função $P_{FH}(E_{SF}) = b/E_{SF}$ [com $b = 0,796 \pm 0,030$, $\chi^2 = 4,89$, N.G.L. = 5 e $P(\chi^2 > 4,89) = 43\%$], efetuado pelo método dos mínimos quadrados²⁰, considerando E_{SF} em unidades decimais. Verificou-se, portanto, que a probabilidade relativa de acidentes aumenta cerca de 30% comparando-se a efetividade de 100% [$P_{FH}(1) = 0,796$] com 77% [$P_{FH}(0,77) = 1,034$]. As barras de erro na Figura 2 foram estimadas como proporcionais a \sqrt{N}/N , sendo N o número total de acidentes em cada intervalo de efetividade [Hursh (2015, comunicação privada)].

Vale ressaltar, contudo, que a relação obtida entre P_{FH} e E_{SF} tem a finalidade de avaliar a variação relativa da probabilidade de acidentes considerando pares de valores distintos de E_{SF} , não representando um parâmetro absoluto para a análise. Os estudos decorrentes de acidentes no transporte ferroviário^{17,19} foram realizados para validar o modelo biomatemático SAFTE-FAST, demonstrando maior incidência de eventos para valores menores de E_{SF} . De fato, no modal aéreo não existem estudos com estatística suficiente²¹ para permitir uma análise similar, fato que corrobora para que os resultados do modal ferroviário sejam extrapolados, com a devida cautela, para o modal aéreo.

DADOS DEMOGRÁFICOS DOS PARTICIPANTES

A presente amostra incluiu 323 aeronautas pertencentes à aviação regular brasileira, dos quais 309 responderam ao questionário biopsicossocial. Entre os respondentes, 219 (71%) eram do sexo masculino (M), 90 (29%) do sexo feminino

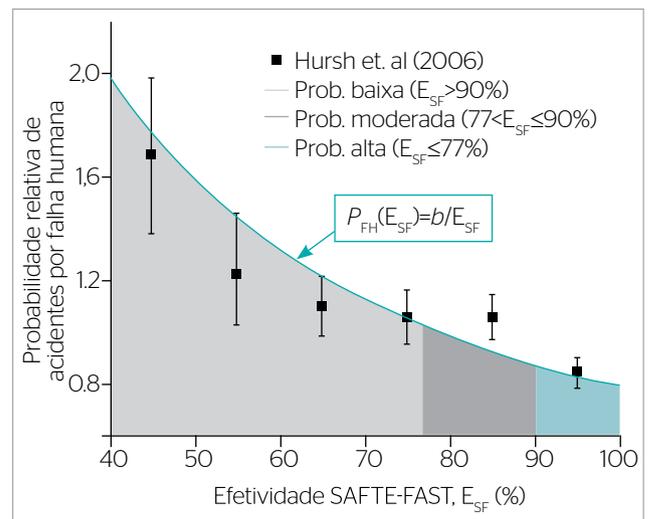


Figura 2. Probabilidade relativa de acidentes causados por falhas humanas em função da efetividade do Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness / Fatigue Avoidance Scheduling Tool (SAFTE-FAST) (n=400).

(F), 166 (54%) pilotos (P) e 143 (46%) comissários de voo (C). As idades médias e respectivos desvios padrões foram: $39,1 \pm 9,5$ (M); $34,4 \pm 6,4$ (F); $40,5 \pm 9,5$ (P) e $34,5 \pm 6,9$ (C).

ANÁLISES DAS ESCALAS DE VOO

Características gerais das escalas de voo

Para as análises das escalas, foram selecionados três meses do ano de 2018, sendo um mês de baixa temporada [maio (n=248)] e os dois outros de alta temporada [janeiro (n=259) e julho (n=261)]. Com isso, pretendeu-se utilizar três meses subordinados à mesma convenção coletiva de trabalho (vigência de 1º de dezembro de 2017 a 30 de novembro de 2018), sendo um mês de baixa, como referência, para verificar a eventual influência da alta temporada em alguns indicadores de fadiga. Por causa do caráter aditivo da área de risco, usaram-se nos três casos meses de 31 dias, incluindo voos de tripulações simples dos indivíduos que aderiram ao estudo até o dia 28 de setembro de 2018.

Efetividade mínima na fase crítica

Uma das variáveis de grande interesse para a identificação de chaves de voo fatigantes (programações de viagem com maior probabilidade de alterações nos ciclos de sono e vigília) é a efetividade mínima na fase crítica (E_{MC}), ou seja, o menor valor de E_{SF} para dado período de avaliação durante os primeiros e os últimos 30 minutos de cada etapa de voo. A Figura 3 apresenta a frequência relativa de E_{MC} com respectivos valores médios, medianas e intervalos interquartis (IIQ), para as escalas de janeiro, maio e julho de 2018. Constatou-se que 77% das escalas de janeiro e julho de 2018 apresentaram ao menos um evento com $E_{MC} \leq 77\%$, enquanto para maio de 2018 essa incidência foi de 54%.

Áreas de risco nas fases críticas do voo

As distribuições das áreas de risco mensais nas fases críticas (HA_C) nas escalas de janeiro, maio e julho de 2018 são apresentadas na Figura 4, juntamente com os respectivos valores médios, medianas e IIQ.

Análises estatísticas das distribuições de E_{MC} e HA_C

Foi efetuado o teste de Kolmogorov-Smirnov nas distribuições de E_{MC} e HA_C , que indicou que ambas as variáveis não possuem comportamento normal, com $p < 0,001$. Com base nesse resultado, realizaram-se testes não paramétricos para verificar a hipótese de sazonalidade nas distribuições.

Os resultados são apresentados na Tabela 1 e demonstraram que tanto E_{MC} quanto HA_C têm distribuições estatisticamente distintas (teste de Kruskal-Wallis), comparando-se os meses de janeiro, maio e julho de 2018 ($p < 0,001$). Na comparação dos grupos dois a dois (teste de Mann-Whitney), verificou-se sazonalidade relevante entre os meses de alta temporada (janeiro e julho de 2018) e o mês de baixa temporada (maio de 2018) tanto para E_{MC} quanto para HA_C ($p < 0,001$). Por outro lado, ao serem comparados os dois meses de alta temporada (janeiro e julho de 2018), constatou-se que não há diferença significativa nem para E_{MC} ($p = 0,773$) nem para HA_C ($p = 0,815$). Todas as análises foram realizadas com o *software* SPSS versão 20.0.0.

DISCUSSÃO

Os resultados apresentados são oriundos de uma amostragem parcial do banco de dados do Projeto Fadigômetro, o qual é pautado em três pilares:

- abordagem operacional;
- coleta automatizada de escalas;
- metodologia científica.

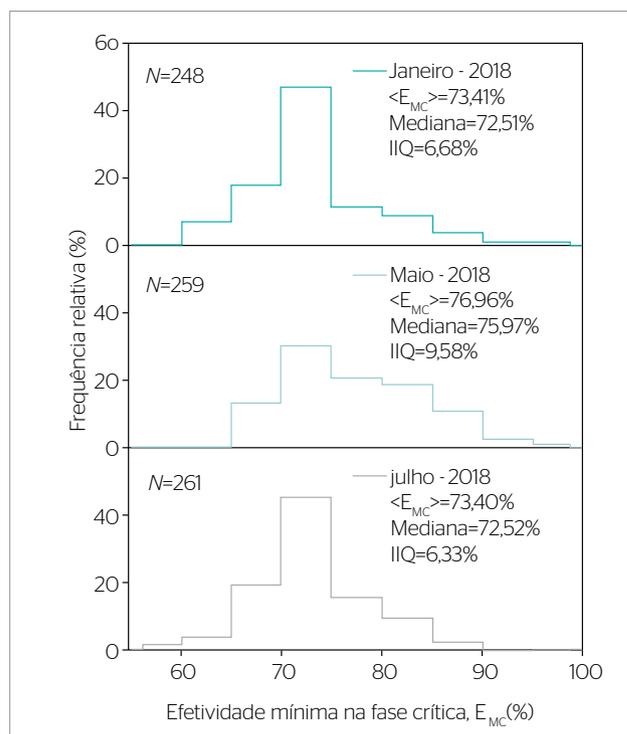


Figura 3. Frequência relativa de efetividade mínima nas fases críticas para os meses de janeiro (painel superior), maio (painel central) e julho (painel inferior) de 2018.

A abordagem operacional é contemplada, uma vez que as escalas realizadas dos aeronautas são avaliadas como um todo, capturando importantes indicadores de fadiga em

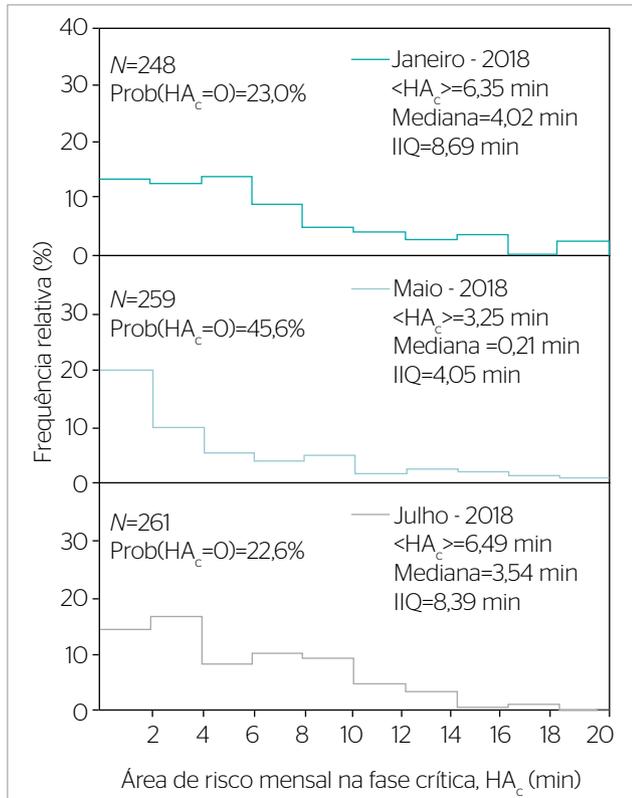


Figura 4. Frequência relativa da área de risco mensal (minutos) nas fases críticas nas escalas de janeiro (painel superior), maio (painel central) e julho (painel inferior) de 2018. Os resultados com área de risco nula foram levados em conta nas análises estatísticas, porém suprimidos dos histogramas.

circunstâncias realísticas de operação. A coleta automatizada de escalas consiste num mecanismo inovador que permite armazenar informações em larga escala, gerando uma amostra de conveniência com característica randômica. O terceiro pilar está relacionado à metodologia científica adotada, baseada no modelo biomatemático SAFTE-FAST, na relação entre E_{SF} e a probabilidade relativa de acidentes (Figura 2) e no conceito de área de risco. A escolha do *software* SAFTE-FAST, entre diversos modelos com características e limitações similares^{10-12,14}, deu-se em virtude de critérios técnicos, já que a ferramenta demonstrou boa capacidade preditiva em relação aos dados objetivos de *psychomotor vigilance test* (PVT)²².

Os histogramas de E_{MC} (Figura 3) demonstram que nos meses de alta temporada (janeiro e julho de 2018) ocorre um pico nas distribuições no intervalo de 70 a 75%, com 77% dos participantes com $E_{MC} \leq 77\%$. Já no mês de baixa temporada (maio de 2018), 54% dos participantes possuem $E_{MC} \leq 77\%$. Esses resultados indicam a necessidade de melhor gerenciamento das escalas de voo e que os limites prescritivos vigentes à época não foram suficientes para a mitigação do risco da fadiga. De fato, a Working Time Society publicou recentemente uma declaração de consenso sobre a ineficácia de limites prescritivos em determinadas condições²³.

A variável E_{MC} tem grande importância para identificar chaves de voo fatigantes, muito embora não possibilite uma análise da exposição global ao risco relativo de fadiga para uma escala mensal de voo, tendo em vista que apenas o valor mínimo de efetividade — para dado indivíduo e determinado período — é computada pelo *software*. Por exemplo, consideram-se duas

Tabela 1. Testes estatísticos realizados com o *software* Statistical Product and Service Solutions (SPSS) versão 20.0.0 para as distribuições de efetividade mínima e área de risco nas fases críticas nas escalas dos meses de janeiro (n=248), maio (n=259) e julho (n=261) de 2018.

| Análises | Teste de normalidade | | | | Testes não paramétricos para amostras independentes | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------|-----|--------|---|-----|---|-----|--------|-------------------|-----|--------|--------|
| | Kolmogorov-Smirnov | | | | Kruskal-Wallis | | | | | Mann-Whitney | | | |
| | Grupos | Estatística | NGL | p | Grupos | N | H | NGL | p | Grupos | N | Z | p |
| Efetividade mínima na fase crítica (E_{MC}) | Jan. 18 | 0,146 | 248 | <0,001 | Jan. 18, maio 18 e jul. 18 | 768 | — | 2 | <0,001 | Jan. 18 e maio 18 | 507 | -5,866 | <0,001 |
| | Maio 18 | 0,095 | 259 | | | | | | | Maio 18 e jul. 18 | 520 | -5,886 | |
| | Jul. 18 | 0,133 | 261 | | | | | | | Jan. 18 e jul. 18 | 509 | -0,289 | |
| Área de risco na fase crítica (HA_c) | Jan. 18 | 0,212 | 248 | <0,001 | Jan. 18, maio 18 e jul. 18 | 768 | — | 2 | <0,001 | Jan. 18 e maio 18 | 507 | -6,146 | <0,001 |
| | Maio 18 | 0,276 | 259 | | | | | | | Maio 18 e jul. 18 | 520 | -6,131 | |
| | Jul. 18 | 0,245 | 261 | | | | | | | Jan. 18 e jul. 18 | 509 | -0,234 | |

NGL: Número de graus de liberdade.

escalas mensais de trabalho distintas, uma com dezenas de eventos com $70\% \leq E_{MC} \leq 75\%$ e outra com apenas um evento com $65\% \leq E_{MC} \leq 70\%$. Para fins de E_{MC} , espera-se que a segunda escala seja mais fatigante do que a primeira. Porém, levando-se em conta que na primeira escala existem dezenas de voos fatigantes, é razoável supor maior probabilidade de falhas humanas, sobretudo pela maior exposição às operações de decolagem e pouso com desempenho cognitivo possivelmente pior. Logo, verifica-se que o parâmetro E_{MC} não é muito eficaz para quantificar o risco relativo nas escalas de voo em termos globais, porém possibilita avaliações consistentes das variações sazonais no setor aéreo, conforme apresentado na Tabela 1.

O conceito de área de risco permite uma avaliação global das escalas dos tripulantes, pois representa a soma de todas as áreas de risco (para dado aeronauta) no período.

Essa abordagem também é apropriada para averiguar variações sazonais da probabilidade relativa de fadiga, assim como medir o efeito relativo em mudanças regulatórias, entre elas a grande mudança em limites prescritivos em decorrência do RBAC 117, da ANAC³.

De fato, conforme pode ser constatado nas Figuras 3 e 4, há variação significativa das medianas e dos IIQ nas distribuições de E_{MC} e HA_C ao compararmos um mês de baixa temporada ($E_{MC}^{mediana}=75,97\%$ e $E_{MC}^{IIQ}=9,58\%$; $HA_C^{mediana}=0,21$ min e $HA_C^{IIQ}=4,05$ min) com os valores consolidados para a alta estação, ou seja, janeiro e julho de 2018 ($N=509$): $E_{MC}^{mediana}=72,52\%$ e $E_{MC}^{IIQ}=6,43\%$; $HA_C^{mediana}=3,70$ min e $HA_C^{IIQ}=8,46$ min. Testes de Mann-Whitney demonstraram oscilações sazonais significativas comparando-se os meses de janeiro e maio, assim como maio e julho de 2018, tanto para E_{MC} quanto para HA_C ($p<0,001$). Isso torna tais grandezas importantes indicadores para se quantificar, de maneira consistente, oscilações sazonais da fadiga no setor aéreo. Importante mencionar também que tais conclusões independem de eventuais imprecisões na relação entre P_{FH} e E_{SF} (Figura 2) decorrentes da extrapolação, em virtude de limitações impostas pela baixa estatística de acidentes aéreos, dos resultados obtidos no modal ferroviário para o modal aéreo.

Cumprido salientar, contudo, que os resultados obtidos têm caráter parcial, uma vez que eventos previstos em escala não relacionados ao voo propriamente dito (eventos *working*) não foram incluídos nas análises da fadiga. Observou-se que tais resultados representam limites inferiores para as áreas de risco e limites superiores de efetividade, visto que sobrestimam as oportunidades de sono nas escalas de voo.

Análises mais robustas que incluam todos os eventos das escalas — e que busquem identificar as causas raízes da fadiga — estão no escopo do Projeto Fadigômetro e serão publicadas posteriormente.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade de se avaliar o estado de alerta de pilotos e comissários de voo da aviação regular brasileira por meio do acoplamento de uma plataforma *web* com o modelo biomatemático SAFTE-FAST, denominado de Projeto Fadigômetro. As distribuições de efetividade mínima nas fases críticas indicaram degradação do nível de alerta dos tripulantes e a necessidade de melhor gerenciamento das escalas. Verificou-se também que os limites prescritivos vigentes à época não foram suficientes para mitigar o risco da fadiga nas operações aéreas. Tanto as distribuições de efetividade mínima quanto as distribuições de áreas de risco nas fases críticas apresentaram variações sazonais significativas (alta e baixa estação). Demonstrou-se que essas grandezas são adequadas para a quantificação do potencial risco relativo de fadiga e subsequente identificação de perigos com vistas a recomendações de segurança para o setor aéreo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação Brasileira de Pilotos da Aviação Civil, à Associação dos Aeronautas da Gol, à Associação dos Tripulantes da LATAM e ao Sindicato Nacional dos Aeronautas o suporte financeiro que propiciou a realização da pesquisa; ao Sr. Denys Sene, da empresa IASERA, o desenvolvimento e suporte da plataforma *web* de conversão das escalas; ao Dr. Otaviano Helene pelas considerações estatísticas; ao Dr. Steven Hursh e à equipe do Institutes for Behavior Resources (IBR), a interação científica profícua e customização do *software* SAFTE-FAST para o cálculo automatizado das áreas de risco; e ao Sr. Philippe Pacheco e as Sras. Marina Rapuano e Mariana Lima, suas importantes contribuições na concepção do estudo. Também agradecem o apoio na divulgação da Comissão Nacional da Fadiga Humana (CNFH) e do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Por fim, agradecem aos aeronautas que aceitaram participar do estudo.

REFERÊNCIAS

1. International Air Transport Association, International Civil Aviation Organization, International Federation of Air Line Pilots Association. *Fatigue Risk Management Systems: Implementation Guide for Operators* [Internet]. Montreal: IATA, ICAO & IFALPA; 2011 [acessado em 13 mar. 2020]. Disponível em: <http://www.icao.int/safety/fatiguemanagement/FRMS%20Tools/FRMS%20Implementation%20Guide%20for%20Operators%20July%202011.pdf>
2. Brasil. Lei nº 13.475, de 28 de agosto de 2017 [Internet]. 2017 [acessado em 13 mar. 2020]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13475.htm
3. Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC 117): Requisitos para gerenciamento de risco de fadiga humana [Internet]. Brasília: ANAC; 2019 [acessado em 13 mar. 2020]. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-117-emd-00>
4. Cassiano SK. Fadiga na aviação civil: um desafio à investigação e prevenção de acidentes aeronáuticos. *Conexão Sipaer*. 2018;9(3):12-21.
5. Comissão Nacional de Fadiga Humana. Manual de Orientações para a Investigação da Fadiga Humana em Ocorrências Aeronáuticas [Internet]. Brasília: CNFH; 2020 [acessado em 23 jun. 2020]. Disponível em: <http://cesv.cenipa.gov.br/index.php/destaques/572-manual-de-orientacoes-da-fadiga-humana>
6. de Vasconcelos CA, Vieira MN, Kecklund G, Yehia HC. Speech analysis for fatigue and sleepiness detection of a pilot. *Aerosp Med Hum Perform*. 2019;90(4):415-8. <https://doi.org/10.3357/AMHP.5134.2019>
7. Akerstedt T, Wright Jr. KP. Sleep Loss and Fatigue in Shift Work and Shift Work Disorder. *Sleep Med Clin*. 2009;4(2):257-71. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2009.03.001>
8. Mello MT de, Esteves AM, Pires MLN, Santos DC, Bittencourt LRA, Silva RS, et al. Relationship between Brazilian airline pilot errors and time of day. *Braz J Med Biol Res*. 2008;41(12):1129-31. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-879X2008001200014>
9. Licati PR, Rodrigues TE, Wey D, Fischer FM, Menna-Barreto L. Correlação dos prognósticos do programa FAST com relatos de fadiga de pilotos da aviação civil brasileira. *Conexão Sipaer*. 2015;6(1):7-17.
10. Hursh SR, Redmond DP, Johnson ML, Thorne DR, Belenky G, Balkin TJ, et al. Fatigue Models for Applied Research in Warfighting. *Aviat Space Environ Med*. 2004;75(3 Supl.):A44-53.
11. Van Dongen HPA. Comparison of mathematical model predictions to experimental data of fatigue and performance. *Aviat Space Environ Med*. 2004;75(3 Supl.):A15-36.
12. Ingre M, Van Leeuwen W, Klemets T, Ullvetter C, Hough S, Kecklund G, et al. Validating and Extending the Three Process Model of Alertness in Airline Operations. *PLoS One*. 2014;9(10):e108679. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0108679>
13. Civil Aviation Authority. *Aircrew Fatigue: A Review of Research Undertaken on Behalf of the UK Civil Aviation Authority*. Reino Unido: Civil Aviation Authority; 2007.
14. Civil Aviation Safety Authority (CASA). *Biomathematical fatigue models: guidance document*. Camberra: CASA; 2014.
15. European Union Aviation Safety Agency. *Effectiveness of Flight Time Limitation (FTL)* [Internet]. EASA; 2019 [acessado em 13 mar. 2020]. Disponível em: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Report%20on%20effectiveness%20of%20FTL_final.pdf
16. Marqueze EC, Nicola ACB, Diniz DHMD, Fischer FM. Working hours associated with unintentional sleep at work among airline pilots. *Rev Saúde Pública*. 2017;51:61. <http://dx.doi.org/10.1590/s1518-8787.2017051006329>
17. Hursh SR, Fanzone JF, Raslear TG. Analysis of the Relationship between Operator Effectiveness Measures and Economic Impacts of Rail Accidents. (Report No. DOT/FRA/ORD-11/13). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation; 2011.
18. Rangan S, Van Dongen HPA. Quantifying fatigue risk in model-based fatigue risk management. *Aviat Space Environ Med*. 2013;84(2):155-7. <https://doi.org/10.3357/asm.3455.2013>
19. Hursh SR, Raslear TG, Kaye AS, Fanzone JF. Validation and Calibration of a Fatigue Assessment Tool for Railroad Work Schedules, Summary Report. (Report No. DOT/FRA/ORD-06/21). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation; 2006.
20. Helene O. *Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial*. 2ª ed. São Paulo: Livraria da Física; 2013.
21. Goode JH. Are pilots at risk of accidents due to fatigue? *J Safety Res*. 2003;34(3):309-13. [https://doi.org/10.1016/s0022-4375\(03\)00033-1](https://doi.org/10.1016/s0022-4375(03)00033-1)
22. Roma PG, Hursh SR, Mead AM, Nesthus TE. Flight Attendant Work/Rest Patterns, Alertness, and Performance Assessment: Field Validation of Biomathematical Fatigue Modeling. (Report No. DOT/FAA/AM-12/12). Washington, D.C.: Office of Aerospace Medicine; 2012.
23. Honn KA, Van Dongen HPA, and Dawson D. Working Time Society consensus statements: Prescriptive rule sets and risk management-based approaches for the management of fatigue-related risk in working time arrangements. *Ind Health*. 2019;57(2):264-80. <https://doi.org/10.2486/indhealth.SW-8>

Endereço para correspondência: Tulio Eduardo Rodrigues - Instituto de Física - Universidade de São Paulo - Rua do Matão, 1.371 - Cidade Universitária - CEP: 05508-090 - São Paulo (SP), Brasil - E-mail: tulio@if.usp.br

