

ANÁLISE DE FATORES HUMANOS E ORGANIZACIONAIS RELACIONADOS AO PROCEDIMENTO DE FRENAGEM DE AERONAVES EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS DESFAVORÁVEIS

Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira

Anderson Ribeiro Correia

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Departamento de Transporte Aéreo e Aeroportos

Marcelo Ramos Martins

Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica
Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos - LabRisco

RESUMO

Este artigo identifica e prioriza os principais fatores contribuintes relacionados ao procedimento de frenagem que ocorrem durante pouso de aeronaves comerciais de médio e grande porte. A literatura disponível e a pesquisa com especialistas indicam que as condições adversas durante o procedimento de frenagem ocorre principalmente quando há condições ambientais desfavoráveis e/ou quando a pista do aeroporto é desfavorável ao pouso. Com o objetivo de identificar os principais fatores humanos, organizacionais, aeroportuários e ambientais que influenciam o procedimento de frenagem, foram analisados os relatórios de acidentes e incidentes da base de dados do National Transportation Safety Board (NTSB) entre 2005 e 2015. Os fatores identificados foram analisados utilizando um modelo de acidente e priorizados de acordo com a probabilidade de ocorrência obtida através da Rede Bayesiana. Assim, os resultados obtidos permitem a seleção dos fatores que devem ser priorizados pelos órgãos competentes, a fim de colaborar com a gestão da segurança no transporte aéreo e reduzir as excursões de pista durante o procedimento de pouso dessas aeronaves. A metodologia utilizada e os resultados encontrados são as principais contribuições deste estudo.

ABSTRACT

This paper identifies and prioritizes the main contributing factors related to braking procedure that occur during the landing procedure of medium- and large-sized commercial aircraft. The literature available and expert research indicate that adverse conditions during the braking procedure mainly occur when there is a failure in braking or when the airport runway is unfavorable for landing. In order to identify the main human, organizational, airport and environmental factors which influence the landing procedure, accident and incident reports from the National Transportation Safety Board (NTSB) database were analyzed between 2005 and 2015. The identified factors were analyzed using an accident model and prioritized according to the probability of occurrence obtained through Bayesian Network. Thus, the results obtained allow the selection of the factors that should be prioritized by the competent agencies in order to collaborate with the management of safety in air transportation and to reduce runway excursions during the landing procedure of these aircraft. The methodology used and the results found are the main contributions of this study.

1. INTRODUÇÃO

Os acidentes aeronáuticos são, por natureza, classificados como sistema sócio-técnico. Os sistemas sócio-técnicos são compostos pelos subsistemas social e técnico, sendo que a visão desses dois subsistemas é integrada (e não dissociada) e as mudanças percebidas em cada um deles, refletem-se no sistema como um todo. Segundo Emery e Trist (1969) o subsistema técnico corresponde às tarefas a serem realizadas e as condições técnicas para a sua realização, envolvendo o ambiente de trabalho, as instalações, os equipamentos, as ferramentas, os procedimentos e normas operacionais, sendo, portanto, responsável pela eficiência potencial da organização. Desde a década de 50, vários esforços de pesquisas foram empreendidos para documentar a localização precisa de acidentes com aeronaves, de forma que fosse possível, por meio desses dados, obter um planejamento eficaz de segurança operacional do aeroporto e seu entorno. Um estudo da *Federal Aviation Administration*, denominado "*Location of Aircraft Accidents/Incidents Relative to Runways*", compilou dados referentes à localização de acidentes relativos à pista do aeroporto envolvendo aeronaves

comerciais (FAA, 1990). Segundo Ashford e Wright (1992), em pesquisas realizadas pela *Airline Pilots Association*, de 1967 a 1992, indicaram que 5% dos acidentes ocorrem em rota e 15% ocorrem nas proximidades dos aeroportos. Os 80% restantes ocorrem nas pistas de pouso e decolagem, em áreas de ultrapassagem e zonas desimpedidas (*clear zones*).

Os estudos iniciais sobre acidentes aeronáuticos se limitaram ao período em que foi realizado o levantamento estatístico de banco de dados. Esses dados, apesar de importante no levantamento das causas dos acidentes, tornam-se restritos ao período da análise. Em outras palavras, as conclusões relacionadas a um determinado levantamento de dados de acidentes não podem ser amplamente aplicadas quando se observa, por exemplo, que a tecnologia utilizada em sistemas de controle de voo das aeronaves está em constante mudança, por exemplo. Para diminuir esses efeitos negativos, têm-se observado que novos estudos estão sendo realizados com um número de amostra (de acidentes ou incidentes) cada vez maior. Como exemplo tem-se os estudos de análise de acidentes desenvolvidos pela IATA (2014), CALTRANS (2002), ACRP 3 (HALL et al., 2008), *Flight Safety Foundation* (FSF, 2009), ACRP 50 (AYRES et al., 2011), Boeing (2010) entre outros. No relatório da ACRP 3, Hall et al. (2008) apresentou um levantamento de 459 acidentes e incidentes do período de 1982 a 2006, destacando apenas eventos *takeoff overrun* (ultrapassagem na decolagem), *landing undershoot* (toque antecipado no pouso) e *landing overrun* (ultrapassagem no pouso), na análise, onde concluiu-se que eventos do tipo *overrun* representaram 80% das ocorrências, sendo 60% do tipo *landing overrun* (LDOR). Apesar da contribuição dos estudos supracitados, com um grande número de amostra, os mesmos se limitaram principalmente aos fatores ambientais e a modelos baseados em dados históricos. A relação existente entre tais ocorrências e os fatores de desempenho humano, por exemplo, não são explicadas. Também não há uma preocupação sistêmica nos resultados, de forma que prevenir acidentes com base nos fatores organizacionais deficitários não é possível. Preocuparam-se, em síntese, em analisar acidentes e/ou incidentes aeronáuticos com base na localização espacial.

Pesquisas e estudos interdisciplinares são necessários para compreender a complexidade dos sistemas sociotécnicos (RASMUSSEN, 1997; LEVESON, 2004). Além disso, por meio de uma ampla visão sistêmica, pode-se compreender os aspectos multidimensionais da segurança, para posteriormente alcançar a modelagem de acidentes de forma mais global. Desde a metade do século passado, foram introduzidos modelos de segurança das partes técnicas e humanas dos sistemas (LEVESON, 1995).

Com o intuito de oferecer uma abordagem sistêmica na análise do procedimento de frenagem de aeronaves de médio e grande portes, este estudo tem como objetivo apresentar um modelo de acidente considerando as condições climáticas, com base em fatores humanos de pilotos comerciais e fatores organizacionais relacionados às empresas aéreas que podem influenciar a operação de frenagem durante o pouso. Dessa forma, o estudo está dividido em: (i) introdução (ii) metodologia, que apresenta os passos utilizados para o desenvolvimento do modelo de acidente relativo ao erro no procedimento de frenagem; (iii) resultados, com análise de fatores críticos considerando condições ambientais desfavoráveis (iv) conclusão.

2. METODOLOGIA

Para obter os resultados da pesquisa, o atual estudo realizou a metodologia em cinco etapas, que estão descritas nos próximos subtópicos.

- (i) pesquisa com especialistas, importante etapa para a análise do modelo proposto;

- (ii) pesquisa de campo em simulador de voo com pilotos experientes e habilitados;
- (iii) levantamento de dados por meio de relatório de acidentes e incidentes;
- (iv) análise das variáveis do estudo e sua taxonomia no modelo; e,
- (v) aplicação do método de redes bayesianas (RB) e população das tabelas de probabilidade condicionais (TPCs).

2.1. Pesquisa com especialistas

Foi realizada consulta com dois especialistas do setor, em momentos diferentes, ambos pilotos de aeronaves comerciais de grande porte, com experiência em voos internacionais de longa duração e engenheiros. Um dos pilotos apresenta certificação no modelo Boeing B737; e o outro, apresenta certificação no modelo Airbus A320. Os pilotos foram consultados quanto às condições desfavoráveis que podem encontrar durante o momento do pouso da aeronave. Também foram discutidos os principais erros operacionais no momento do pouso, exceto possíveis falhas mecânicas. Isto porque, o presente estudo considera, para fins de análise, as falhas técnicas desprezíveis. Verificou-se que as respostas destas consultas foram semelhantes. Os pilotos destacaram como um conjunto de fatores que compõe uma pista desfavorável: a pista contaminada devido às ranhuras (*grooving*) inadequadas – ranhuras que facilitam a frenagem do avião (Figura 1); e, a pista interdita em uma das cabeceiras, por motivos de obras ou manutenção na pista que torna a pista de pouso curta para o procedimento de frenagem. (Figura 2).



Figura 1: Diferença visual da pista com e sem ranhuras (*grooving*).

Fonte: <http://www.proysesa.com>



Figura 2: Cabeceira interdita em uma das Pistas do Aeroporto Internacional de Guarulhos.

Fonte: <http://www.infraero.gov.br>

Ambas as situações, apresentadas nas figuras, afetam a distância necessária de parada da aeronave; e conseqüentemente, afetam os pilotos durante o procedimento de frenagem. . Neste caso, a falha operacional que compõe uma frenagem inadequada consideradas foram: (i) acionamento do trem de pouso e/ou, (ii) acionamento do reverso, nesta ordem. Em vias de regra, primeiramente são acionados os spoilers que funcionam como freios aerodinâmicos, com a função de impedir que a velocidade do avião aumente excessivamente durante a descida, no pouso são chamados de speedbrakes. A função principal dos *speedbrakes* é aumentar a razão de descida de uma aeronave sem aumentar consideravelmente a velocidade, atuam como freios aerodinâmicos em voo para ajudar a reduzir a velocidade e permitir descidas com ângulos mais acentuados. No solo são usados para destruir a sustentação das

asas e possibilitar maior aderência das rodas com a pista a fim de aumentar a eficiência dos freios. Desse modo, para o desenvolvimento do modelo, foram descritos os fatores que podem influenciar os elementos operacionais do sistema de frenagem que são acionados no momento que a aeronave toca a pista de pouso. Uma vez que a aeronave toca a pista, o trem de pouso é solicitado, sua função é apoiar o a aeronave no solo, amortecer o impacto do pouso e, principalmente frear o avião, além de controlar a direção durante o taxiamento. Com o trem de pouso no solo, os pilotos decidem pelo uso do reversor de potência (*thrust reverser*) (BANDEIRA, et al. 2018a).

2.2 Observação no Pátio de Simuladores

Foram realizadas visitas a um grande centro de treinamento de pilotos em voo localizado na cidade de Guarulhos, São Paulo. A visita teve como objetivo acompanhar as tarefas do piloto, simuladas no Airbus 320, com testes em diversos procedimentos e diferentes situações ambientais desfavoráveis – infraestrutura aeroportuária e clima – para avaliar as habilidades e o desempenho dos pilotos. Para desenvolver o modelo de acidente de procedimento de frenagem em pouso dois testes foram descritos com os seguintes procedimentos na cabine de simulação: (I) Pouso com presença de fluido contaminante (com pista molhada) e (II) Pouso em pista com cabeceira interditada com pista seca. Foram observados os principais fatores que influenciaram a operação no momento dos testes. As habilidades observadas no pátio de simuladores, estão melhor descritas em Bandeira et al. (2018b).

2.3 Levantamento de Dados

Os dados para esta pesquisa foram obtidos a partir do banco de dados disponível na *webpage* da *National Transportation Safety Board* (NTSB, 2016). Esta base de dados fornece uma ferramenta para encontrar registros sobre acidentes com vários campos de pesquisa. As palavras “*contaminated runway*”; “*closed runway*”; “*landing; gear*”, “*speedbrakes*”, “*ground spoilers*”, “*thrust reverse*” and “*overrun*” foram usadas como um filtro na consulta. É importante ressaltar, que o banco de dados está em constante atualização, e por este motivo, é possível que está seleção feita para esta pesquisa apresente um número maior em outro momento de busca. Os campos de pesquisa selecionados e os critérios correspondentes usados para cada estão na Tabela 1. Os Regulamentos Federais de Aviação nos Estados Unidos (FARs) classificam a operação da aeronave por tipo; dessa forma, foram consideradas apenas as empresas de companhias aéreas regulares (*part 121: air carrier*) no âmbito da pesquisa.

Tabela 1: Tipo de Dados selecionados do Banco de Dados da NTSB.

TIPO DE DADO	CAMPO DE BUSCA	CRITÉRIO USADO
Informações de Acidente/Incidente	Período	1/1/2005 a 12/31/2015
	Tipo de Investigação	Acidente/Incidente
Aeronave	Categoria	Aeronave
	Construção Não Profissional	Não
Operação	Tipo de Operação	Companhia aérea regular (<i>part 121: air carrier</i>)
Detalhes do Evento	Palavras de Busca	contaminated runway; closed runway; landing; gear; speedbrakes; ground spoilers; thrust reverse; overrun

Como resultado, 50 relatórios de acidentes e/ou incidentes foram obtidos do banco de dados e seus resumos foram revisados. Foram desconsiderados do banco de dados: 8 registros repetidos na busca, 12 registros que continham qualquer uma das palavras-chaves, mas não tinham relação com erros operacionais destacados na pesquisa, 1 relatório em análise preliminar, 9 relatórios com falhas mecânicas ou estruturais da aeronave e 6 relatórios com

falhas de manutenção. Logo, um total de 14 acidentes foram utilizados na análise. As informações do banco de dados foram compiladas de acordo com esses relatórios.

2.4. Análise das Variáveis do Estudo e a Taxonomia no Modelo

A pesquisa considerou as relações entre os fatores humanos, fatores organizacionais, fatores ambientais e as habilidades do piloto. Sobre estas inter-relações, vale destacar que todos estes fatores podem interferir nas habilidades do piloto (direta ou indiretamente) (BANDEIRA et al., 2017). A relação entre esses fatores foi organizada em uma estrutura lógica, conforme o modelo de rede genérica sugerido por Martins e Maturana (2013) desenvolvida para colisões de navios cargueiros e adaptado para o desenvolvimento de modelo de acidente na aviação por Bandeira et al. (2018b) (Figura 3).

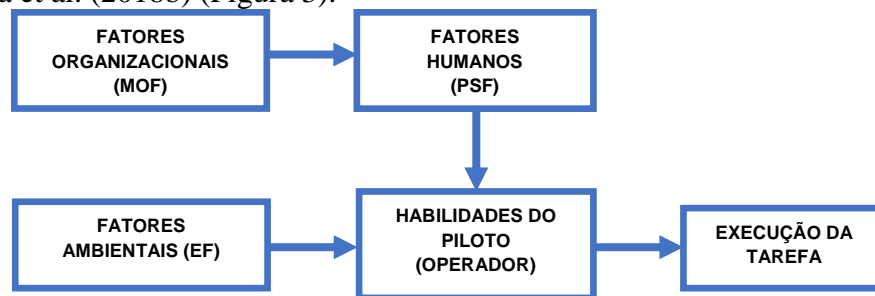


Figura 3: Modelo de Acidente na Aviação.

Fonte: Bandeira, et al. (2018b).

A análise deste estudo, relaciona os fatores nas seguintes categorias:

- *Habilidades*: refere-se às habilidades necessárias para o desenvolvimento de uma determinada tarefa;
- *Fatores Humanos* (são os *Performance Shaping Factor*, PSF): São fatores internos ao operador; neste caso, aos pilotos (equipe de voo) que vai influenciar em suas habilidades quando a tarefa for desempenhada.
- *Fatores Organizacionais* (*Management and Organizational Factors*, MOF): refere-se aos fatores da organização, ou seja, da companhia aérea em que o piloto serve;
- *Fatores Ambientais* (*Environmental Factors*, EF): São fatores externos à organização ou à equipe de voo (ATM/ATC) e/ou o ambiente interno (cockpit), clima, infraestrutura aeroportuária, ATM/ATC, e/ou *cockpit*) que vão influenciar diretamente as habilidades dos pilotos durante a execução de uma determinada tarefa (clima, infraestrutura aeroportuária, controle de tráfego aéreo).

A partir dos relatórios coletados no banco de dados, foram obtidos os MOFs, PSFs, EFs e as habilidades. Os fatores foram destacados das sinopses e da narrativa completa do texto. Uma vez encontrados, os fatores foram definidos segundo a literatura, e classificados em dois estados quanto à sua conformidade – um estado positivo e um estado negativo. Os dados encontrados na pesquisa foram agrupados na Tabela 2, e definidos segundo cada relatório.

2.5. Aplicação do Método de Redes Bayesianas (RB)

As “Redes Bayesianas” (RB) foram originárias do campo da Inteligência Artificial, usadas para tratar análises nas quais incertezas estão presentes, e vêm tornando-se usual na metodologia de estudos que utilizam o conhecimento probabilístico (LANGSETH e PORTINALE, 2007). O método foi aplicado no início dos anos 2000 nos Estados Unidos para avaliar o modelo de risco de um sistema aeronáutico desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA) e a NASA (LUXHØJ e COIT, 2006). Um das primeiras aplicações do método na Europa está relacionado com o procedimento de arremetidas de aeronaves para

obter a probabilidade de falhas dos sistemas da aeronave e, fornecer informações sobre o estado do sistema de segurança para a tomada de decisão gerencial (ROELEN et al., 2008).

Tabela 2: Resultado da Análise da Coleta de Dados.

ANO	NÚMERO NTSB	EVENTO	MOF	PSF	EF	HABILIDADES
2005	ANC05LA025	Acidente	Sistema de Treinamento	Experiência em Situações Adversas	Clima – Tesoura de Vento	Consciência Situacional
2005	CHI05FA077	Acidente	Sistema de Treinamento	Experiência em Situações Adversas	Clima – Tesoura de Vento Infraestrutura aeroportuária – pista contaminada Infraestrutura aeroportuária – sinalização de pista	Consciência Situacional
2005	NYC05FA094	Acidente	Sistema de Treinamento	Conhecimento Técnico	-	Monitoração
2005	DCA06MA009	Acidente	Sistema de Treinamento	Tempo de Execução	Clima – Vento de cauda	Julgamento
			Política e Padrões da Empresa	Conhecimento Técnico	-	Conhecimento baseado na capacidade
2007	DCA07MA072	Acidente	Controle de Fadiga do Piloto	Fadiga	Infraestrutura aeroportuária – pista curta e contaminada	Julgamento
					-	Monitoração
2007	DFW07IA077	Incidente	Sistema de Treinamento	Experiência em Situações Adversas	Clima – Tesoura de Vento	Consciência Situacional
2007	DCA07FA037	Acidente	Política e Padrões da Empresa Controle de Fadiga do Piloto	Fadiga	Infraestrutura aeroportuária – pista contaminada	Julgamento
2008	DFW08IA087	Incidente	Sistema de Treinamento	Conhecimento Técnico	-	Julgamento
2009	CEN09IA294	Incidente	Sistema de Treinamento	Conhecimento Técnico	-	Julgamento
2010	DCA11IA015	Incidente	Sistema de Treinamento	Tempo de Execução	-	Monitoração
2011	DCA11FA035	Acidente	Sistema de Treinamento	Tempo de Execução	-	Julgamento
2011	DCA11IA047	Incidente	Política e Padrões da Empresa	Tempo de Execução	-	Monitoração
2012	DCA12FA058	Acidente	Sistema de Treinamento	Conhecimento Técnico	-	Conhecimento baseado na capacidade
2013	DCA14FA002	Acidente	Sistema de Treinamento	Conhecimento Técnico	-	Julgamento

Em linhas gerais, pode-se dizer que uma RB é um grafo direcionado acíclico o qual é definido por um componente qualitativo e um quantitativo. O componente qualitativo é representado na topologia do grafo e o componente quantitativo é formado pelas probabilidades condicionais associadas ao modelo (NEAPOLITAN, 2004). Dado o grafo $G = (V, E)$, por exemplo, onde V são os “nós” que representam variáveis discretas ou contínuas, e E é um conjunto de pares ordenados de V , chamados de arcos, que representam a dependência entre os nós. Os arcos e os nós fornecem uma representação de independência ou dependência

condicional. Cada arco construído de uma variável X para uma variável Y , por exemplo, representa uma dependência direta de Y em relação a X ; neste caso, a variável X é chamada de nó-pai de Y ; e a variável Y , de nó-filho de X . Segundo Russell e Norvig (2004), a distribuição de probabilidade conjunta de uma variável, é obtida a partir do conceito de independência condicional. Considerando $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ equivalente à $P(X_1=x_1, X_2=x_2, X_n=x_n)$, onde X_i é a denominação de uma variável e x_i é uma denominação de seus estados. Logo, a distribuição conjunta em termos de uma probabilidade condicional, usando a regra do produto é (Eq. 1):

$$P(x_1 \dots x_n) = P(x_n | x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1}, \dots, x_1) \quad (\text{Eq.1})$$

Reduzindo cada probabilidade conjuntiva a uma probabilidade condicional, temos a Eq. 2:

$$P(x_1 \dots x_n) = P(x_n | x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1} | x_{n-2}, \dots, x_1) \dots P(x_2 | x_1) P(x_1) = \prod_{i=1}^n P((x_i | x_{i-1}, \dots, x_1)) \quad (\text{Eq.2})$$

Essa identidade é verdadeira para qualquer conjunto de variáveis aleatórias e é chamada Regra da Cadeia. Para o caso de uma rede bayesiana, as equações citadas permitem a representação de independência de um nó em relação aos seus ascendentes, exceto os nós-pais, em que para toda variável X_i na rede, temos (Equações 3 e 4):

$$P(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1) = P(X_i | \text{Pais}(X_i)) \quad (\text{Eq.3})$$

Onde:

$$\text{Pais}(X_i) \subseteq \{x_{i-1}, \dots, x_1\} \quad (\text{Eq.4})$$

A Equação 4 permitirá a obtenção de qualquer probabilidade conjunta de uma RB a partir dos valores encontrados nas TPCs, no caso de variáveis discretas; para variáveis contínuas, são representadas por meio de função de densidade de probabilidade condicionada.

2.5.1. Premissas adotadas no Análise para as TPCs da RB do Modelo

A análise quantitativa inicia-se a partir da inclusão de todas as probabilidades a priori dos nós-raízes. Tais probabilidades podem ser fornecidas pela literatura, por dados estatísticos e/ou estimativas feitas por especialistas do setor (SKYBRARY, 2016; BOEING, 2017). Em seguida, as TPCs podem ser preenchidas, onde são especificadas as relações entre os nós. Então, obtém-se a probabilidade conjunta da rede para a variável (nó) de interesse; no caso, o nó que representa o evento de interesse (procedimento de frenagem). Considerou-se que se todos os nós-pais estiverem no estado positivo (adequados) o estado positivo do nó-filho em questão será positivo, ou seja 100%. Porém se todos os nós-pais estiverem no estado negativo (inadequados), o estado negativo do nó-filho resultará em uma probabilidade segundo a categoria do fator (apresentada a seguir). Para as possibilidades ou combinações existente entre os nós-pais foi utilizada a técnica de interpolação para popular as TPCs, segundo o intervalo de valores designado para cada grupo. Ressalta-se que a soma dos estados para uma determinada possibilidade é sempre 100%. Desse modo, as premissas adotadas foram:

- **MOF**: Todos os fatores organizacionais são nós-pais e têm 99% de probabilidade de estarem no estado positivo e 1% de probabilidade de estarem no estado negativo.
- **PSF**: Todos os fatores humanos são nós-filhos dos MOFs, conforme já apresentado nas RBs. A probabilidade de estarem no estado positivo (designado como “adequado” no modelo) quando todos os nós-pais estiverem no estado positivo foi 100%. A probabilidade de estarem no estado negativo, quando todos os nós-pais estiverem no estado negativo (designado como “inadequado” no modelo), foi de 50%. Dessa forma, mesmo que todos os MOFs estejam influenciando com o estado negativo de seus fatores, ainda assim, há 50% de chance dos fatores humanos estarem no estado positivo (adequados).
- **EF**: Todos os fatores ambientais são nós-pais. Neste caso, o ATC/ATM, o clima e a infraestrutura aeroportuária. Para o estado negativo, adotou-se 1,00E-06.

- **Habilidade:** A probabilidade de estarem no estado positivo quando todos os nós-pais estiverem no estado positivo foi de 100%. A probabilidade de estarem no estado negativo quando todos os nós-pais estiverem no estado negativo foi de 30%.
- **Tarefa:** O evento de interesse, “procedimento de frenagem”, depende das tarefas de acionamento do trem de pouso e do acionamento do reverso. O evento “procedimento de frenagem” assumiu 80% de chance de ocorrer no estado positivo quando houver erro no procedimento do reverso; E, assumiu 20% de chance de ocorrer o estado positivo quando houver erro no procedimento do trem de pouso. Em contrapartida, assumiu-se 20% de chance de ocorrer no estado negativo quando houver erro no procedimento do reverso; e, 80% de chance de ocorrer o estado negativo quando houver erro no procedimento do trem de pouso. Para ambas as atividades no estado negativo, tem-se 100% de chance de erro.

3. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos segundo a evidência da falha. Desse modo, foram desenvolvidos três cenários para o modelo de acidente proposto. Com estes cenários, é possível obter a análise da causa mais provável do erro no procedimento de frenagem; e a análise do impacto dos fatores do procedimento de frenagem, apresentados a seguir.

- **Cenário 1:** Modelo de Acidente **sem** evidência da Falha no Procedimento de Frenagem;
- **Cenário 2:** Modelo de Acidente **com** evidência da Falha no Procedimento de Frenagem;
- **Cenário 3:** Modelo de Acidente **com** a evidência do Estado Negativo nos EFs.

3.1. Cenário 1: Modelo de Acidente sem evidência da Falha no Proc. de Frenagem

Considerando as dependências condicionais entre os fatores identificados (MOF, PSF, EF e habilidades), conforme proposto pelo modelo de acidente proposto, a probabilidade ocorrer falha durante o procedimento de frenagem é estimada em 0,063% ou $6,3 \times 10^{-4}$; portanto, a probabilidade de sucesso é de 99,9% ou 0,99937. Esses resultados são mostrados na Figura 4.

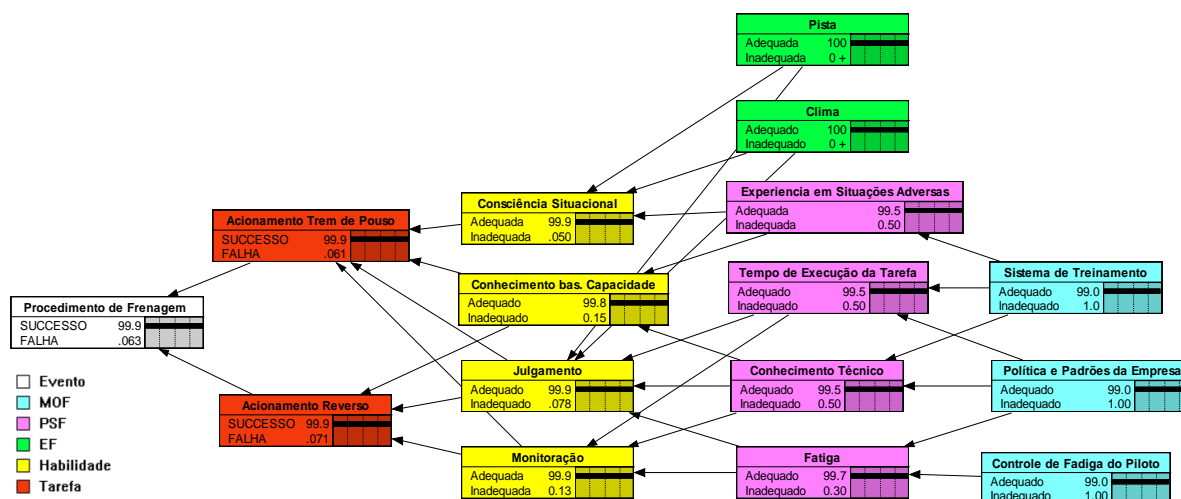


Figura 4: Modelo de Acidente sem evidência da Falha – Cenário 1.

3.2. Cenário 2: Modelo de Acidente com evidência da Falha no Proc. de Frenagem

Adicionalmente, as causas mais prováveis de erro durante o pouso da tarefa podem ser obtidas considerando a evidência do erro no modelo proposto (FALHA), ou seja, 100% de probabilidade do estado negativo no evento “procedimento de frenagem” (Figura 5).

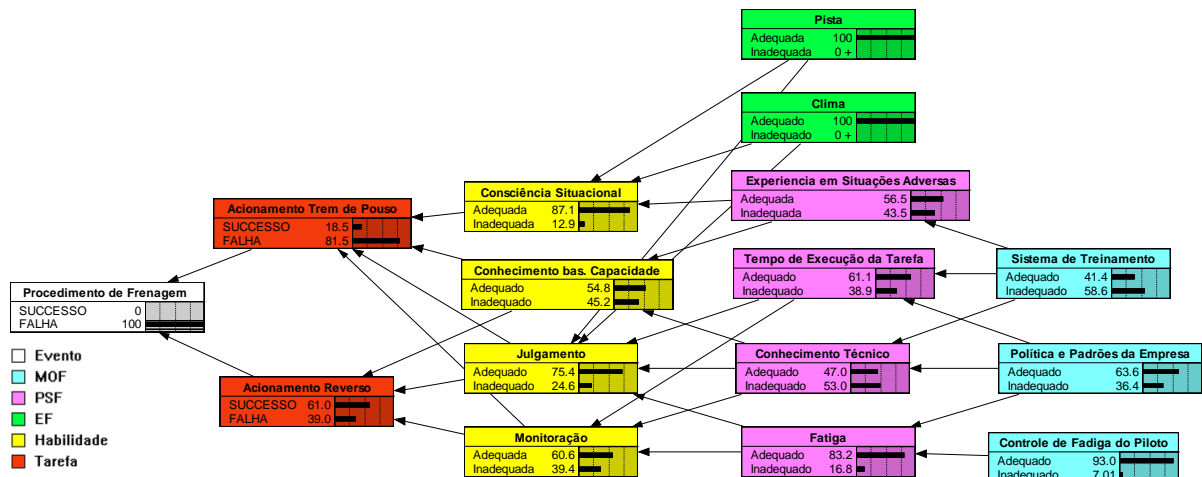


Figura 5: Modelo de Acidente com evidência da Falha – Cenário 2.

Comparando os estados negativos dos Cenários 1 e Cenário 2, pode observar o aumento da probabilidade do estado negativo de cada um dos fatores. Observa-se que os fatores mais importantes na análise do erro no procedimento de frenagem são: “sistema de treinamento” (MOF), “conhecimento técnico” (PSF) e “conhecimento baseado na capacidade” (habilidade).

3.3. Cenário 3: Modelo de Acidente com a evidência do Estado Negativo nos EFs

Foram considerados os estados negativos dos fatores ambientais (pista e clima), conforme os testes da pesquisa de campo. Os resultados obtidos das observações realizadas durante os testes de pilotagem no simulador de voo com os pilotos estão destacados na Tabela 3. Com a evidência do estado negativo dos fatores ambientais (fatores com condições desfavoráveis) os resultados mostram que a probabilidade de ocorrer uma falha no procedimento de frenagem é de 4,38% ou $4,38 \times 10^{-2}$; portanto, a probabilidade de sucesso no evento de interesse é de 95,6% ou 0,95617 (Figura 6). Comparando os cenários 1 (sem evidência) e 2 (com evidência nos fatores ambientais), tem-se um aumento de 6952% da probabilidade de ocorrer a falha no procedimento de frenagem, considerando apenas essas condições desfavoráveis.

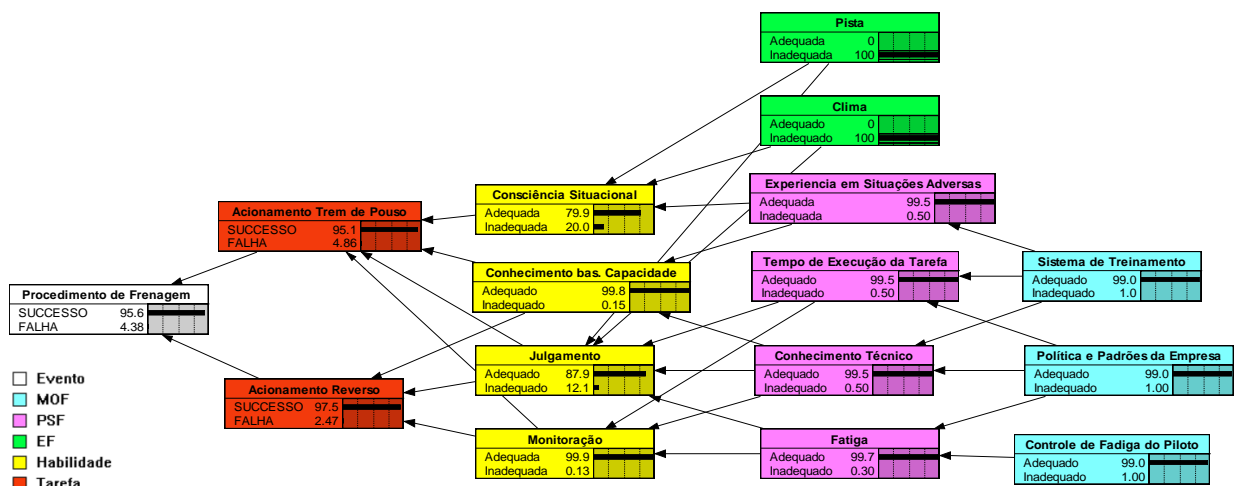


Figura 6: Modelo de Acidente com evidência da Falha nos Fatores Ambientais – Cenário 3.

Tabela 3: Fatores Ambientais destacados nos Testes de Simulação de Voo.

TESTE	PROCEDIMENTO	DESCRIÇÃO	FATORES AMBIENTAIS	CONSIDERAÇÕES	CONCLUSÃO
I	Pouso com presença de fluido contaminante (pista molhada)	Observou-se que, durante a aproximação, os pilotos alteraram a configuração do sistema de frenagem para o pouso em condições de pista molhada (chuva forte) conforme procedimentos estabelecidos do manual da aeronave em simulação, garantindo dessa forma, maior segurança na operação de pouso. De acordo com o RMP da IATA-RERR, uma pista que não esteja suficientemente sulcada tem o potencial de contaminação da água devido a uma drenagem lenta após a chuva (IATA e ICAO, 2012).	<p>Fator: Infraestrutura aeroportuária. A presença de contaminante na pista devido ao <i>grooving</i> inadequado.</p>	<p>Ainda que, em condições desfavoráveis, os pilotos sigam adequadamente os procedimentos operacionais de frenagem como, por exemplo a presença de fluido contaminante, as condições inadequadas de pista e condições climáticas desfavoráveis são fatores que, associados, podem aumentar a chance de ocorrer <i>overruns</i> (Hall et al, 2008).</p>	Fatores inadequados podem provocar a redução da margem de segurança no pouso e exigir uma maior solicitação das habilidades do piloto.
			<p>Fator: Clima. A chuva forte presente no momento do pouso.</p>	<p>As condições climáticas interferem nas habilidades dos pilotos (Bandeira et al., 2018b). No caso, a visibilidade foi prejudicada.</p>	
II	Pouso com perda significativa de freio em pista seca em condições de vento desfavoráveis	Observou-se que os as habilidades dos pilotos foram bastante solicitadas, além disso a comunicação com a torre de controle foi fundamental para que o pouso da aeronave ocorresse da melhor forma possível.	<p>Fator: Infraestrutura aeroportuária. A presença de uma das cabeceiras da pista interditada por obras reduz o comprimento de pista para pouso.</p>	<p>O piloto configura o pouso da aeronave considerando o encurtamento da pista, o que exige bastante das suas habilidades.</p>	
			<p>Fator: Clima. As condições de vento impostas pela situação.</p>	<p>A equipe de voo é treinada para manter as condições de estabilidade da aeronave durante condições adversas de vento; porém, uma maior demanda de habilidades é solicitada. A prática em situações adversas contribui para o sucesso da operação nessa situação.</p>	

5. CONCLUSÃO

Inicialmente, com base em uma revisão da literatura, e por meio de levantamento de banco de dados de pesquisa de campo, este estudo identificou os fatores influenciadores (MOF, PSF e EF) nas habilidades necessárias dos pilotos que impactam no procedimento de freagem durante o pouso de aeronaves comerciais, atividade importante para o desempenho seguro do pouso. Posteriormente, o modelo proposto foi descrito e utilizado para modelar a relação entre os fatores identificados e apoiar a construção de um RB para analisar quantitativamente o evento de interesse. Embora este evento seja considerada uma das mais importantes para a segurança de voo, ela não foi analisada em nenhum estudo anterior de forma sistêmica, levando em consideração os fatores organizacionais, fatores humanos, habilidades e fatores ambientais.

Diferentemente de outros estudos, o modelo geral de aviação propõe uma maneira sistemática e eficiente de organizar os fatores de influência por meio de categorias. A classificação dos fatores influenciadores em categorias, conforme proposto pelo modelo geral, contribuiu significativamente para identificar os fatores e suas relações. Dessa forma, é possível definir as dependências condicionais entre eles, modelados por um RB. O uso de RB para encontrar a causa mais provável com o objetivo de identificar os fatores mais importantes e priorizar a ação de mitigação também é uma contribuição importante deste trabalho. Até onde sabemos, nenhum outro estudo propôs uma abordagem semelhante. Assim, o modelo de procedimento de frenagem foi adaptado e projetado para contribuir com uma análise de segurança em sistemas sociotécnicos, no caso deste estudo, na segurança do transporte aéreo. Observe que fatores ligados a falhas de componentes em sistemas de aeronaves não estão sendo considerados no modelo geral.

Estudos de falhas em equipamentos aeronáuticos já são tradicionalmente considerados e modelados, além de apresentar uma baixa probabilidade de ocorrência. Portanto, a ênfase foi dada a fatores organizacionais, fatores humanos, fatores ambientais e habilidades dos pilotos. Assim, nossa intenção foi modelar uma das principais tarefas da equipe de voo considerando fatores que precedem o erro da equipe. Essa modelagem deve ser capaz de obter uma análise representativa do sistema real; uma visão sistêmica do processo também é necessária. Nesse sentido, este modelo de acidente preenche essa lacuna. Além disso, outras áreas sociotécnicas também podem usar esse modelo para obter o impacto dos fatores que influenciam os erros operacionais. Os resultados indicam subsídios para propor ações mitigadoras e podem colaborar com a gestão da segurança operacional do transporte aéreo. A melhor maneira de melhorar o último é atacar os pontos mais sensíveis. Desse modo, os fatores destacados na análise, uma vez priorizados dentro da empresa, podem promover a redução de excursões de pista durante o procedimento de pouso de aeronaves de médio e grande portes.

Agradecimentos

Os autores agradecem, de modo especial, aos pilotos e engenheiros que participaram das consultas realizadas pela pesquisa. A autora agradece o apoio financeiro dado pela CAPES e pela FAPESP na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashford, N., Wright, P. H. (1992) Airport Engineering. 3rd Ed., Nova York, John Wiley & Sons.
- Ayres, M., Shirazi, H., Carvalho, R., Hall J., Speir, R., Arambula, E., David, R., Wong, D., Gadzinski, J. (2011) ACRP Report 50: Improved Model for Risk Assessment of Runway Safety Areas. Airport Cooperative Research Program. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Bandeira, M.C.G.S.P., Correia, A.R., Martins, M.R. (2018a) Landing Accident Model for Medium and Large Sized Commercial Aircraft. 22nd ATRS World Conference Seoul, South Korea July 2 - 5. DOI:

- 10.13140/RG.2.2.35095.27041.
- Bandeira, M.C.G.S.P., Correia, A.R., Martins, M.R. (2018b) General model analysis of aeronautical accidents involving human and organizational factors. *J. Air Transp. Manag.* 69, 137–146. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.01.007.
- Bandeira, M.C.G.S.P., Correia, A.R., Martins, M.R. (2017) Method for measuring factors that affect the performance of pilots. *Transportes*, 25 (2): 156-169. DOI: 10.14295/transportes.v25i2.1374.
- Boeing (2010) Report of the Boing Company. pp. 156. Available in <http://www.boeing.com/assets/pdf/companyoffices/financial/finreports/annual/2011/annual_report.pdf>. Accessed: April 2, 2015.
- Boeing (2016) Statistical summary of commercial jet airplane accidents: worldwide operations 1959-2015. Seattle, Washington: Boeing Commercial Airplanes, 2016.
- Caltrans (2002) California airport land use planning handbook. California: California Department of Transportation, 455 p. Disponível em: <<http://www.dot.ca.gov/hq/planning/aeronaut/documents/alucp/AirportLandUsePlanningHandbook.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2012.
- Emery, F. E.; Trist, E. L. (1969) Socio-technical systems. In: *Systems thinking*, ed. Penguin, p. 286.
- Federal Aviation Administration (1990) Location of commercial aircraft accidents/incidents relative to runways. Washington, DC: FAA. (Report Nº DOT/FAA/AOV90-1).
- Flight Safety Foundation (2009) Reducing the Risk of Runway Excursions: Report of the Runway Safety Initiative.
- Hall, J., Ayres Jr., M., Wong, D., Appleyard, A., Eddowes, M., Shirazi, H., Speir, R., Pitfield, D., Caves, R., Selezneva, O., Puzin, T. (2008) ACRP Report 3: Analysis of Aircraft Overruns and Undershoots for Runway Safety Areas. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- International Air Transport Association (2014) Safety report. Montreal: IATA, 2014. Disponível em:<http://www.iata.org/publications/Pages/safety_report.aspx>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- International Air Transport Association, International Civil Aviation Organization (2012) Runway excursion risk reduction toolkit. 2ª. Ed. IATA e ICAO. Disponível em:<<https://www.iata.org/iata/RERRtoolkit/main.html>>. Data de acesso: 14 mai. 2015.
- International Federation of Air Line Pilots' Associations (2009) Runway Safety Manual, Aerodrome & Ground Environment Committee, IFALPA.
- Langseth, H., Portinale, L. (2007) Bayesian networks in reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 92, n. 1, p. 92-108. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.037.
- Leveson, N. A. (1995) *Safeware: system safety and computers*. New York: Addison Wesley, 1995.
- Leveson, N. A. (2004) A New Accident Model for Engineering Safer Systems. *Safety Science*, 42 (4), 237-270. DOI: 10.1016/S0925-7535(03)00047-X.
- Luxhøj, J. T.; Coit, D. W. (2006) Modeling low probability/high consequence events: an aviation safety risk model. In: *Reliability and Maintainability Symposium*, Newport Beach, CA, USA. Proceedings... Newport Beach, CA, USA: IEEE, June 14-16, 2006, p. 215-221.
- Martins, M., Maturana, M. (2013) Application of Bayesian Belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. *Reliability Engineering & Systems Safety*, Vol. 110, 89-109. DOI: 10.1016/j.res.2012.09.008.
- National Transportation Safety Board (2016) Aviation accident database & synopsis. Washington, DC: NTSB. Disponível em:<https://www.nts.gov/_layouts/ntsb.aviation/index.aspx>. Acesso: 04 set. 2016.
- Neapolitan, R. E. (2004) *Learning Bayesian Networks*. Pearson Prentice Hall. New Jersey, 2004.
- Rasmussen, J. (1997) Risk Management in a Dynamic Society: A Modelling Problem. *Safety Science*, 27 (2-3): 183-213. DOI: 10.1016/S0925-7535(97)00052-0.
- Roelen, A.; Lin, P.; Hale, A. (2008) Accident models and organisational factors in air transport: the need for multi-method models. *Safety Science*, v. 49, n. 1, p. 5-10.
- Russel, J.; Norvig, P. (2004). *Inteligência artificial*. 2. edição, Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2004.
- Skybrary (2016) Human error types. Disponível em: <https://www.skybrary.aero/index.php/Human_Error_Types#Error_frequencies>. Acesso em: 26 abr. 2017.

Dra. Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira (mgalvao@ita.br)

Prof. Dr. Anderson R. Correia (correia@ita.br)

Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Departamento de Transporte Aéreo e Aeroportos.

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - São José dos Campos, SP, Brasil.

Prof. Dr. Marcelo R. Martins (mrmantin@usp.br)

Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - LabRisco.

Av. Professor Mello Moraes, 2231 – São Paulo, SP, Brasil.