
Nuvens de cinzas vulcânicas e a aviação de grande porte: seus potenciais efeitos na atividade aérea

Natan de Oliveira Lemes^{1,2}, Anna Paula Bechepeche^{1,3}

1 Pontifícia Universidade Católica de Goiás

2 natan.lms@gmail.com

3 abechepeche@yahoo.com.br

RESUMO: Nuvens de cinza vulcânica são produzidas por erupções explosivas de vulcões, podendo alcançar grande desenvolvimento vertical, atingindo a altitude onde voam aeronaves comerciais. Quando uma aeronave em voo entra em contato com partículas de cinza, sofre danos em sua estrutura e motores, podendo ter suas capacidades de voo e navegabilidade seriamente comprometidas. Em horas a nuvem pode alcançar grandes altitudes, e a cinza é levada para longe pelos ventos altos. Há esforços conjuntos de vários países para minimizar os efeitos danosos à atividade aérea para tentar prever e monitorar a erupção vulcânica, comunicando-a às tripulações em voo. As nuvens de cinza também podem causar grandes danos econômicos à atividade aérea, pelos distúrbios gerados por sua dimensão. Foi feita uma pesquisa bibliográfica exploratória com base nos autores consagrados nesse tema, fazendo levantamento do que se sabe sobre esse fenômeno natural e os recursos e tecnologias existentes para gerenciar seu risco. O trabalho tem como objetivo analisar como e por que a cinza vulcânica é um perigo para aeronaves em voo, como ela ocorre em forma de grandes nuvens, seus principais efeitos na estrutura da aeronave, quais os distúrbios e danos econômicos pode causar à atividade aérea. É estudada a comunicação de sua ocorrência a tripulações durante o voo e atuais técnicas e tecnologias para diminuir seus possíveis efeitos negativos à aviação. Conclui-se que nuvens de cinza ainda representam um sério risco para as aeronaves em voo, mesmo com as tecnologias das quais a aviação dispõe atualmente para gerenciar potenciais danos.

Palavras Chave: Erupção vulcânica. Segurança aérea. Aeronaves em voo.

Volcanic ashes clouds and large size aviation: potential effects on aerial activity

ABSTRACT: Volcanic ashes are produced by volcanic explosive eruptions, reaching great vertical development, rising up to altitudes where commercial aircrafts normally fly. When an airborne aircraft encounters ash particles, it sustains damage to its structure and engines, and may have its flying capabilities and airworthiness severely compromised. In a matter of hours it's possible for the cloud to reach great altitudes, afterwards the ash is taken away by high winds. There are international efforts made by many countries to minimize the damaging effects to aerial routine, and also an endeavor for predicting and monitoring the volcanic eruption, communicating such events to the crews. Ash clouds are also potential cause of great economic losses to the aerial system, due to disturbs created by its dimension. It was made an exploratory research through the authors on this subject, gathering what is well known about this natural phenomenon and the existing resources and technologies to manage its risk. This paper aims on a analyzing how and why volcanic ashes are a hazard to in flight aircrafts, how it occurs on the shape of big clouds, its main effects on the aircraft structure, and which disturbs and economic losses it can cause to aviation. Concerns are made about communicating the occurrence of these clouds to crews during flight and actual techniques and technologies to decrease its possible negative effects to aviation. It's concluded that ash clouds still represent a real risk to aircrafts during flight, even with the existing technologies to manage its potential damages.

Key words: Volcanic eruption. Air safety. Airborne aircrafts.

Citação: Lemes, NO, Bechepeche, AP. (2019) Nuvens de cinzas vulcânicas e a aviação de grande porte: seus potenciais efeitos na atividade aérea. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 10, N°. 1, pp. 31-44.

1 INTRODUÇÃO

Em 1982 dois jatos comerciais em rota para a Austrália, ao cruzar a Indonésia, perderam empuxo dos motores por ingerir cinzas do vulcão Galunggung em Java, descendo mais de 20.000 pés (CASADEVALL, 1994). Em 1989, no Alasca, uma aeronave Boeing 747 perdeu potência em todos os quatro motores e chegou próximo de colidir com o solo por voar através de uma nuvem de cinzas do vulcão Redoubt.

O que é a cinza vulcânica é uma pergunta antiga, datada desde a antiguidade do homem. Cientistas nas últimas décadas do século 20 conseguiram estudos memoráveis de cinzas vulcânicas e a erupção que as produz, e também utilizaram equipamento em laboratório para estudar os vários tipos de cinzas em escala microscópica. Começaram a ir além de coletar simples amostras em depósitos no chão para coletá-las com aviões e balões em nuvens de erupção a altitudes de até 20 km, explica Casadevall (1994). Foi nessa época também que se começou a dar atenção ao perigo que esse tipo de nuvem representa para aeronaves em voo.

Uma grande preocupação em relação a esse tipo de nuvem e a aviação é o caminho que a informação percorre entre a ocorrência do evento e o seu conhecimento por parte de uma tripulação em voo. Uma de suas principais características é que, a partir da erupção vulcânica, o desenvolvimento vertical da nuvem é rápido e em questão de horas é possível que a ela alcance grandes altitudes em que voam aeronaves comerciais (LECHNER *et al.*, 2017).

Para Bonadonna *et al.* (2012), mitigar o perigo para a segurança aérea requer cooperação e esforço de vulcanologistas, meteorologistas, controladores de tráfego, fabricantes de motores e estruturas e tripulações. Em julho de 1991 aconteceu em Seattle, EUA, o primeiro Simpósio Internacional de cinza vulcânica e segurança aérea. Mais tarde, como resultado das consequências das erupções de 2010 na Islândia para a aviação, 52 especialistas em vulcões, meteorologia, dispersão atmosférica e monitoramento baseado em solo de doze países se reuniram para discutir um modelo de dispersão de cinzas e como melhorar a comunicação entre a comunidade de pesquisa e órgãos operacionais dentro da aviação.

Um dos objetivos do trabalho é entender por que as nuvens de cinzas vulcânicas são um sério perigo para a atividade aérea, especialmente de grande porte. São estudadas as características dessa nuvem, relacionando-a com a atividade aérea e são mostrados seus principais efeitos nocivos para uma aeronave em voo. O trabalho busca discutir, também, os esforços multilaterais dos órgãos e entidades internacionais da aviação com objetivo de atenuar os riscos à atividade aérea, discorrendo sobre tecnologias e recursos atuais que existem para mitigar seus efeitos. Será abordada a comunicação da ocorrência desse fenômeno natural para tripulações durante o voo.

São objetivos específicos do trabalho: apresentar as principais características das nuvens de cinza vulcânica e suas propriedades físicas, elencar seus efeitos na aeronave em voo e potenciais danos à estrutura. Mostrar as principais características físicas e processos de formação das nuvens de cinzas vulcânicas. Analisar tecnologias atuais para mitigar seu risco à aviação e possíveis descontinuidades que possam existir para alertar a tempo tripulações de sua ocorrência.

Será feita uma pesquisa bibliográfica e descritiva, ao estudar e descrever características, propriedades e relações existentes na realidade que abrange as cinzas vulcânicas e a aviação. Para Cervo *et al.* (2007), este tipo de pesquisa ocorre quando se registra, analisa e correlaciona fatos ou fenômenos, sem manipulá-los. O método escolhido permite agrupar e descrever informações e posteriormente estabelecer relações dentro da realidade estudada. A pesquisa é feita com base em conhecimento consolidado já existente sobre o assunto em artigos, livros e textos relacionados ao tema.

Espera-se com o trabalho entender a dimensão do problema e descobrir se existem gargalos para que uma tripulação em voo tome conhecimento desse fenômeno a tempo. Para Barros *et al.* (2000), por meio de pesquisas descritivas procura-se descobrir com que frequência um fenômeno ocorre, sua natureza, suas características, causas, relações e conexões com outros fenômenos. São explorados e analisados autores que contribuíram com material e conhecimento da área em questão.

O trabalho está dividido em duas partes. No primeiro capítulo, é tratado do histórico das nuvens de cinzas vulcânicas, quando começaram as preocupações a respeito da sua relação com a atividade aérea. O que é e do que é composta a cinza, o processo de formação da nuvem de cinzas, seus efeitos na estrutura da aeronave. Percorre-se através dos órgãos internacionais que existem com objetivo de lidar com esse fenômeno natural. É feita menção sobre incidentes aéreos envolvendo tal fenômeno. No segundo capítulo, serão abordadas atuais tecnologias e técnicas que existem para tentar mitigar os efeitos nocivos à atividade aérea, tanto na segurança quanto relativos a danos econômicos. Será feita uma análise em relação a possíveis problemas que possam haver na comunicação desses eventos para tripulações em voo.

2 NUVENS DE CINZAS VULCÂNICAS E A ATIVIDADE AÉREA

Como explica Lechner *et al.* (2017), desde o início da era dos jatos na década de 1960, tem havido significativo e contínuo crescimento em viagens aéreas e um crescente uso de aeronaves altamente tecnológicas no limitado espaço aéreo civil. No mesmo período, aumentou a probabilidade de encontro de aeronaves com nuvens vulcânicas nos locais do planeta com maior concentração de vulcões ativos. O número cada vez maior de aeronaves voando tem levado a uma crescente preocupação devido à maior possibilidade desses encontros.

No contexto da aviação, segurança é o estado em que a possibilidade de danos a pessoas e propriedades é reduzida a, e mantida em ou abaixo de um nível aceitável através de um processo contínuo de identificação de perigo e gerenciamento de risco à segurança (OACI – Organização da Aviação Civil Internacional, 2013).

2.1 O PERIGO DAS NUVENS DE CINZAS PARA A AVIAÇÃO

Lima (2013) afirma que ainda que o número exato de vulcões existentes não seja exatamente definido, há estimativa de que o planeta Terra tenha algo mais que 1600 vulcões dispostos tanto na superfície terrestre quanto na marítima, mas somente vulcões que produzem erupção explosiva representam ameaça para aeronaves em voo. Apesar de não ser um evento recorrente na natureza, nuvens de cinzas vulcânicas já causaram sérios incidentes envolvendo voos comerciais, além de prejuízos econômicos de modo geral e também à aviação.

Segundo Casadevall (1994), um dos maiores problemas desse tipo de nuvem é que elas podem ser confundidas com nuvens normais, durante o dia, ou a tripulação em um voo à noite não notar sua presença, o que pode levar a uma catástrofe aérea. Cinzas vulcânicas criadas pela erupção de um vulcão ativo ascendem a grandes altitudes e são carregadas para longe

pelo vento e ainda podem permanecer na atmosfera por um período considerável. Suas partículas são muito pequenas para refletir ondas de radares meteorológicos em aeronaves comerciais, e para Casadevall (1994), mesmo voando à luz do dia, a tripulação pode interpretar uma nuvem de cinzas como uma nuvem comum de água e gelo e não a considerar como um perigo, devido sua coloração.

De acordo com Grindle e Burcham (2003), partículas muito pequenas de cinza, com tamanho de um a dez micrômetros (1 micrômetro = 1/1000000 metro) podem ser encontradas a mais de 1800 km de distância de um vulcão. As partículas maiores e mais pesadas caem mais próximas ao vulcão que lhes deu origem, não sendo capazes de ascender a grandes altitudes. Ainda de acordo com o autor, mais de 100 aeronaves comerciais encontraram inesperadamente cinza vulcânica em voo e em aeroportos.

Essas grandes nuvens representam risco real para a aviação de grande porte, especialmente quando a tripulação não está alarmada de sua presença. Entidades relacionadas à indústria aeronáutica têm empregado esforços no sentido de buscar contramedidas e sistemas que identifiquem com precisão a presença de cinzas vulcânicas no ar. Para Christmann *et al.* (2015), ainda que muito tenha sido feito, a concentração máxima aceitável de cinza vulcânica na atmosfera e níveis de dosagem para as aeronaves ainda não foram precisamente definidos pela comunidade aeronáutica.

Para Lechner *et al.* (2017), ainda há desafios em informar aeronaves em voo sobre a exata localização de nuvens de cinza potencialmente perigosas em seu caminho, principalmente pouco depois de a erupção ocorrer. São dificuldades como previsão confiável e detecção do início da erupção em uma base global, observar sua dispersão em tempo real, capturar sua estrutura complexa e expedir avisos em tempo para o *cockpit* (cabine onde fica a tripulação de voo), planejadores de voo e sistemas de gerenciamento de voo.

2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS NUVENS

O vulcão é uma estrutura geológica de milhões de anos, e desde o surgimento do planeta Terra a crosta terrestre é marcada pela existência de vários deles. O ramo da ciência que estuda os vulcões é a Vulcanologia, que possui relação com a Geologia e Geofísica (LIMA, 2013). Tendem a se formar nas margens das placas tectônicas, e podem ocorrer em continentes ou áreas oceânicas, sendo que esses últimos normalmente não geram nuvens de cinza capazes de trazer transtornos à aviação.

Segundo Casadevall (1994), há basicamente três processos diferentes de erupção que produzem cinza vulcânica: 1) descompressão de magma ascendente, crescimento de bolhas de gás e fragmentação de magma espumoso na abertura do vulcão; 2) mistura explosiva de magma com terra ou água da superfície (hidrovulcânico) e 3) fragmentação de rochas do solo durante rápida expansão de vapor e água quente freática. Variações no estilo de erupção e características das cinzas produzidas dependem de vários fatores, como temperatura do magma, conteúdo do gás, viscosidade e conteúdo de cristais no magma antes da erupção, e ainda propriedades físicas da rocha que cerca a abertura vulcânica.

A ascensão de magma em direção à superfície da Terra antes de uma erupção normalmente gera sinais que podem ser detectados se houver algum monitoramento apropriado no lugar, auxiliando a prever a erupção. Estes sinais podem ser detectados por monitoramento de terremotos usando sismômetros, medição da deformação do solo e observação de mudança na atividade hidrológica, emissão de gases e explosões de vapor (LECHNER *et al.*, 2017). A comunidade internacional da aviação, por meio da OACI, estabeleceu um código de quatro níveis de cor para referência do estado geral de um vulcão, que pode servir de informação para os gerentes operacionais nas empresas aéreas. Este código, porém, não representa a situação das cinzas no ar ou atmosfera, apenas o estado de atividade vulcânica de um vulcão, como mostra a figura 1.

Código de cores	Estado de atividade vulcânica
VERDE	Vulcão está normal, em estado não eruptivo, ou após uma mudança de um nível maior de alerta, a atividade vulcânica cessou, e o vulcão voltou ao seu estado normal, não eruptivo.
AMARELO	Vulcão dá sinais de elevada inquietação acima de níveis conhecidos, ou depois de uma mudança de nível maior de alerta, atividade vulcânica diminuiu significativamente mas continua a ser monitorada de perto.
LARANJA	Vulcão exibe inquietação com probabilidade aumentada de erupção, ou erupção está em andamento com pouca ou nenhuma emissão de cinzas.
VERMELHO	Erupção é sabida ser iminente com emissão significativa de cinza na atmosfera sendo provável, ou erupção já está em andamento com significativa emissão de cinzas na atmosfera.

Figura 1 - Código de cores criado pela OACI para definir o estado da atividade vulcânica de um vulcão conhecido (LECHNER e tal, 2017).

Grandes nuvens de cinzas têm origem em erupções magmáticas explosivas. A explosividade da erupção é relacionada em maior parte a pressões excessivas dentro do magma causadas por gases saindo de solução conforme o magma se aproxima da

superfície terrestre e encontra pressões cada vez menores, até chegar à pressão atmosférica. Depois que o magma alcança a superfície terrestre e uma erupção começa, a espuma altamente viscosa é quebrada por descompressão, (CASADEVALL, 1994). Essa teoria tem sido aceita pela comunidade global de especialistas.

Cinzas vulcânicas são muito diversas em sua origem e composição, mas normalmente são formadas por fragmentos minerais e de rocha e cacos de vidro, que se originam do magma resfriado. Em muitas erupções, há também gotas de ácido revestindo os grãos de cinza. O tamanho e formato dos pedaços dependem do tamanho e formato das bolhas de gás presentes dentro do magma imediatamente antes de uma erupção. O tamanho dos fragmentos vai desde metros, no caso de grandes blocos expelidos próximo à abertura vulcânica, podendo chegar a nanômetros ($1 \text{ nanômetro} = 1.10^{-9} \text{ metro}$), na fina cinza dentro das nuvens dispersas. As propriedades físicas das cinzas vulcânicas dependem majoritariamente de suas proporções relativas de vidro e fragmentos minerais e de rocha, bem como da composição química desses componentes e do tamanho de seus grãos. Casadevall (1994) afirma que a dureza de seus componentes é de cerca de 5.5 na escala de Mohs (onde o talco tem dureza um e o diamante tem dureza 10), podendo variar de dois a sete nessa escala.

A massa de espuma de magma quase sólida é quebrada em partículas que são aceleradas para fora da abertura, por conta do grande diferencial de pressão na interação com a atmosfera. Explosões de grande magnitude podem produzir colunas que chegam a alturas de até 50 km, ejetando grandes quantidades de partículas de cinza, podendo os fragmentos menores ser carregadas para muito longe da erupção. Segundo Grindle e Burcham (2003), essa grande dispersão é causada por fenômenos atmosféricos. Lima (2013) salienta que as cinzas podem percorrer milhares de quilômetros em várias direções a grandes velocidades devido aos ventos rápidos na alta atmosfera, podendo atingir regiões muito distantes da erupção, transmitindo uma falsa sensação de segurança para aqueles que dela estão longe.

Uma coluna de erupção consiste de uma região inferior, de impulso gasoso, constituída pelo jato de material expelido da abertura, que representa normalmente menos de dez por cento da altura total; acima, uma região convectiva que constitui a maior parte da coluna e por fim uma região superior parecida com um guarda-chuva, movida por ascensão de inércia e de grande espalhamento lateral, onde a cinza começa a ser carregada pelo vento. Essa configuração se aplica a todas as colunas de cinza, desde aquelas que são sistemas estáveis mantidas por fluxo de material constante àquelas que são produzidos por uma explosão instantânea e ascendem como um corpo isolado (CASADEVALL, 1994). A figura 2 ilustra as partes que constituem uma coluna de nuvem, de baixo para cima: região de impulso gasoso, de ascensão convectiva e zona de guarda-chuva.

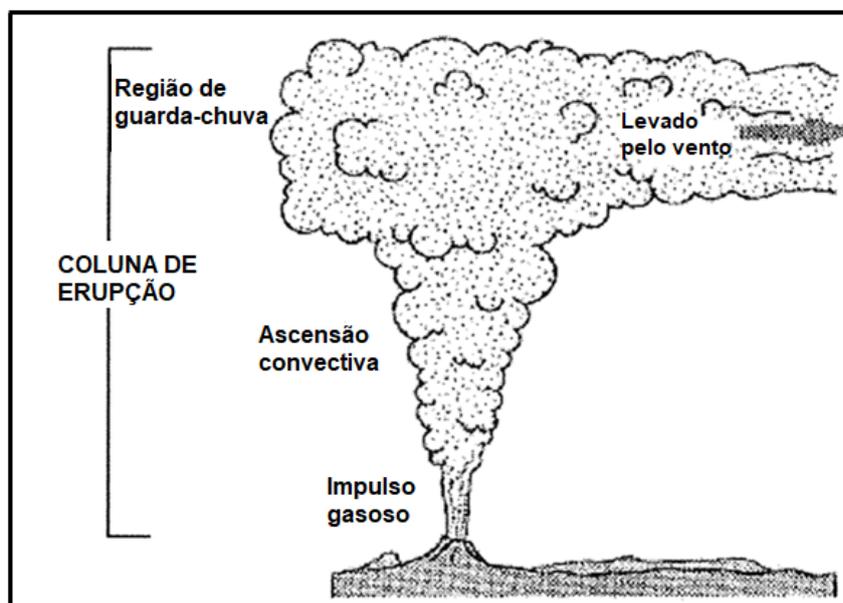


Figura 2 - Constituição da coluna de nuvem (CASADEVALL, 1994).

Dentro da nuvem de cinzas há cacos de vidro leves, separados dos grãos de rocha mais pesados por gravidade. Cacos são pedaços de paredes das bolhas da espuma quebrada no magma que sai da abertura vulcânica. Quando se tornam grandes sistemas, as grandes nuvens de cinza normalmente ganham um caráter mais estável. As colunas variam em altura desde as baixas, originadas de explosões em baixa escala, até grandes sistemas convectivos que rapidamente transportam cinza e gases vulcânicos para a estratosfera. A parte que desliza com o vento em altitude é chamada de Pluma, de acordo com Casadevall (1994). Algumas colunas se originam de lançamentos instantâneos de cinza e gás, e seu crescimento é fenômeno isolado que não alcança grandes altitudes, enquanto outras são sistemas convectivos mais estáveis, alimentados por um fluxo quase constante de material da abertura vulcânica.

Os vulcões que representam perigo para a operação aérea são denominados como vulcões explosivos, como explica Lima (2013). Ainda que quase todos os tipos de erupções explosivas sejam capazes de gerar nuvens de partículas e plumas perigosas à aviação, as colunas de erupções vulcânicas são provavelmente as mais perigosas devido a sua frequência, imprevisibilidade, alto conteúdo de cinza e capacidade de alcançar facilmente altitudes bem acima de rotas comuns de voo. O entendimento

desses fenômenos por parte dos pesquisadores vem tanto de observações quanto de medições em vulcões em erupção e também de modelagem fluidodinâmica do comportamento da flutuação desses sistemas (BONADONNA *et al.*, 2012).

2.3 EFEITOS NOCIVOS NO MOTOR A JATO E FUSELAGEM DA AERONAVE

Quando uma aeronave em voo entra em uma nuvem de cinzas é muito grande a chance de todos os motores do avião serem atingidos, devido ao imenso volume dessa nuvem. Um motor danificado por tais cinzas pode sofrer danos irreparáveis e tornar-se inutilizável devido ao violento efeito corrosivo que sofre. As partículas que formam essas nuvens são duras e abrasivas, podendo causar desgaste significativo em hélices e lâminas de compressores, além de arranhar a janela do cockpit, a cabine onde fica a tripulação, diminuindo a visibilidade, como explica Casadevall (1994).

As partículas de cinza possuem baixo ponto de derretimento, derretem na câmara de combustão devido a sua alta temperatura, e a massa cerâmica criada gruda nas lâminas do rotor, bocal de combustível e combustores, o que pode causar a parada total do motor em voo. Podem ainda causar chamas nos motores, pois quando aquecidas se incendiam dentro do motor. Além disso, como realça Lima (2013), os gases vulcânicos quando combinados com moléculas de água se tornam ácidos, podendo corroer e comprometer a vida útil de componentes da aeronave mais sensíveis. A figura 3 mostra o caminho que as cinzas percorrem ao entrar em um motor durante o voo.

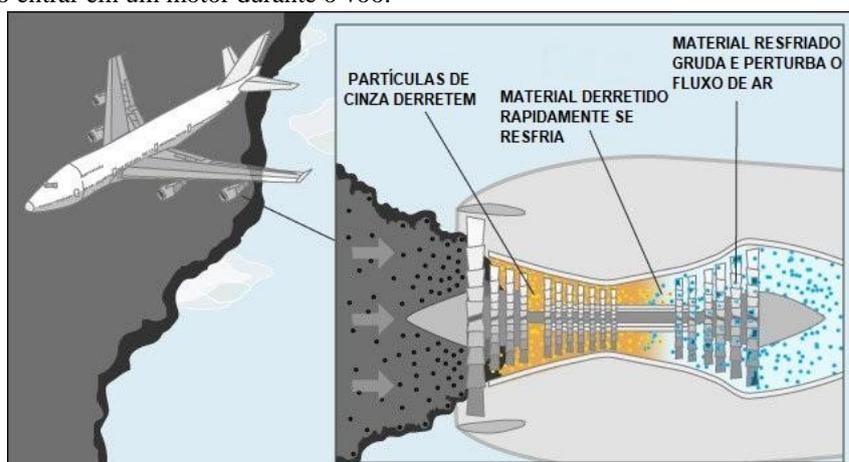


Figura 3 - Caminho percorrido pelas partículas de cinza quando ingeridas por um motor durante o voo (MINIER, 2017).

Grindle e Burcham (2003) afirmam que algumas aeronaves foram quase perdidas e várias foram danificadas devido ao encontro com tais nuvens. Danos incluíram casos em que todos os motores apagaram e a aeronave planou a altitudes menores até que os motores fossem reativados para prosseguir ao pouso. A extensão do dano depende da concentração de partículas e aerossóis dentro da nuvem, o tempo que a aeronave com ela permanece em contato e as ações tomadas pela tripulação para sair dela. Ainda segundo os autores, partículas ingeridas pelo motor passam pelos dutos de ventilação e circulam através da aeronave, podendo entupir sistemas de filtragem de ar e se espalhar no interior da cabine, sendo capazes ainda de danificar o sistema elétrico da aeronave, instrumentos de navegação e até desativar o sensor de detecção de fogo na área de cargas.

Como ressaltam Bonadonna *et al.* (2012), mesmo pequenas concentrações de cinza na atmosfera podem trazer distúrbios à aviação porque motores a turbina são particularmente afetados pela ingestão de partículas no ar por conta da corrosão. Os materiais de que são feitas as aeronaves, metal, vidro, e plástico, são facilmente arranhados e erodidos pelos pequenos e duros fragmentos de rocha da nuvem, fazendo com que as superfícies de uma aeronave voltadas para frente possam ser danificadas, tais como janelas de cockpit, luzes de pouso, bordo de ataque de asas e cauda, cobertura do motor e nariz da aeronave. Janelas podem ficar tão arranhadas a ponto de os pilotos perderem considerável parte da visibilidade (GRINDLE e BURCHAM, 2003). A figura 4 mostra parte da janela direita de uma aeronave erodida por partículas de cinza.



Figura 4 - Janela de cockpit erodida durante o voo por partícula de cinza (SERVRANCKX, 2016).

Em fevereiro de 2000, uma aeronave DC-8 de pesquisa, pertencente à agência americana NASA, inadvertidamente voou através de uma nuvem de cinzas difusa do vulcão Mt. Hekla na Islândia, quando voava da Base aérea de Edwards, na Califórnia, para Kiruna, na Suécia (GRINDLE e BURCHAM, 2003). O encontro ocorreu em total escuridão, sem lua, no início da manhã, aproximadamente 35 horas após o início da formação da nuvem. Por não haver nenhuma alteração na indicação dos instrumentos, a tripulação não percebeu sua presença.

Após inspeção e desmontagem dos motores da aeronave nas instalações da *General Electric*, fabricante dos motores, descobriu-se que havia erosão no bordo de ataque das lâminas da turbina, dutos de ar para resfriamento entupidos e uma camada fina de cinza dentro das passagens de ar, além de uma cobertura com bolhas de cinza em volta das lâminas. O custo estimado para reformar os quatro motores da aeronave para condições de voo foi de 3,2 milhões de dólares, segundo Grindle e Burcham (2003). Ainda que esse encontro tenha ocorrido com uma nuvem difusa e não muito densa, o tempo de exposição foi suficiente para gerar os danos supracitados. A figura 5 mostra o desgaste das pás de um motor causado por partículas de cinza, e também os dutos internos de arrefecimento das lâminas, que podem ser entupidos por cinza, levando a um aquecimento anormal durante a operação.

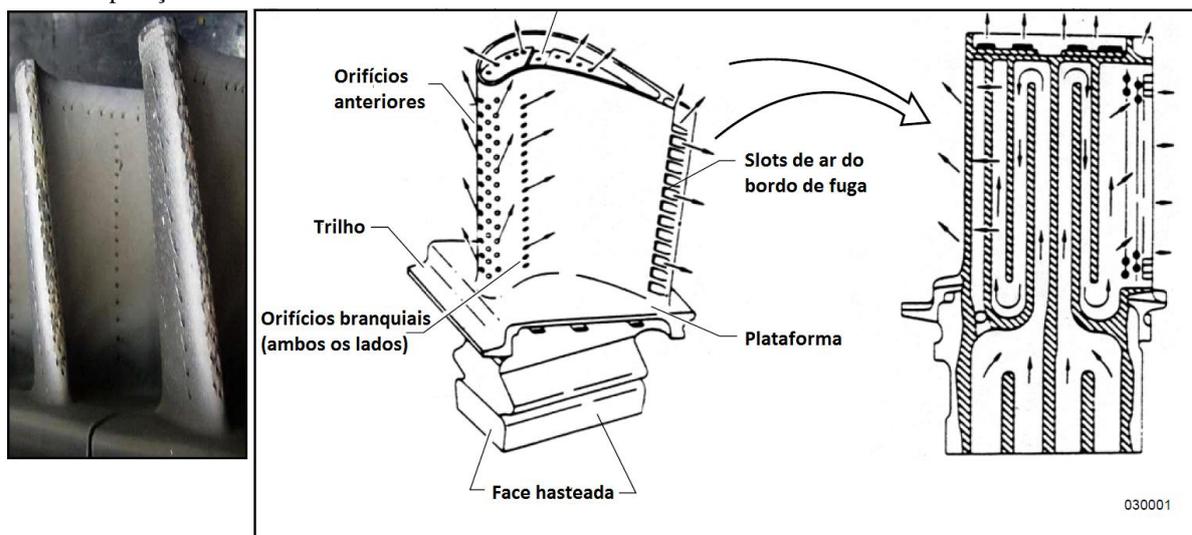


Figura 5 - Dutos de arrefecimento das lâminas de um motor a jato (GRINDLE e BURCHAM, 2003).

2.3.1 Números de ocorrências em voo entre aeronaves e nuvens de cinza e suas severidades

Lima (2013) afirma que as aeronaves comerciais equipadas com motores a reação foram projetadas para operar em ambientes livres de poeira e gases corrosivos, sendo que a ingestão de partículas vulcânicas resultará na deterioração de sua performance ou até mesmo sua inutilização. Guffanti *et al.* (2010) salientam que de 1953 a 2009 há registros de 129 incidentes reportados envolvendo encontro de aeronave em voo com cinza vulcânica. O número de ocorrências inicialmente parece não ser tão grande porque os encontros não são reportados todas as vezes, e, além disso, os números cobrem apenas eventos nos quais a aeronave foi inspecionada a procura de danos logo após o ocorrido, no solo. Casos de exposição repetida a partículas durante longo prazo, que poderia reduzir a vida útil de partes da aeronave ou o tempo entre manutenções, não foram capturados pelos dados.

Os efeitos observados pela tripulação de voo e a extensão dos danos à aeronave variam muito entre as ocorrências. De um total de 129 reportadas, 94 foram encontros confirmados com cinzas; destes, em 79 houve algum grau de dano ao motor e estrutura. Dos 79 citados, 26 incidentes envolveram de significativa a severo dano para motor ou estrutura, dos quais nove envolveram algum motor desativado durante o voo, sendo três casos em que houve perda de todos os motores. A maior parte dos incidentes ocorreu dentro de 24 horas após o início da produção de cinzas. Segundo Christmann *et al.* (2015), durante as erupções de 2010 que afetaram a Europa, 186 reportes de indícios de cinza em voo foram recebidos pelas agências de aviação, ainda que não seja possível que cada um deles seja confirmado como realmente uma ocorrência.

De acordo com Guffanti *et al.* (2010), 38 vulcões diferentes, localizados em 16 países, provocaram estragos em aeronaves em voo, sendo que oito deles causaram cinco ou mais ocorrências. Algumas aeronaves não tiveram dano aparente, e o único indício de cinza foi o reporte pela tripulação de odor de enxofre ou descarga eletrostática na janela do cockpit. A distância entre o encontro com uma nuvem de cinza e o vulcão que a deu origem variou de 100 até 930 km, e alguns dos casos ocorreram durante a luz do dia. A maior parte ocorreu a altitudes acima de 25 mil pés. É notável que o tempo de duração da exposição da aeronave às cinzas não foi longo, indo de dois a 13 minutos.

Ainda segundo Guffanti *et al.* (2010), em dois casos dos considerados acima, a subida para sair da nuvem em potência máxima foi identificada como fator chave para o apagamento dos motores, pois quando a potência foi aumentada, mais ar carregado de cinzas foi ingerido pelos motores. Em 2000, um Boeing 737 e um 747 próximos ao aeroporto de Narita no Japão voaram através de uma nuvem do vulcão Miyake-jima, a somente 200 km do aeroporto. Os motores continuaram funcionando, mas os sistemas de voo e controle eletrônico do motor sofreram mau funcionamento e houve severa perda de visibilidade devido abrasão de quase toda a janela no cockpit.

Os casos mais emblemáticos de incidente envolvendo cinzas ocorreram quando os motores da aeronave apagaram em voo ou foram desligados pela tripulação por indicação de fogo. Após a aeronave descer considerável altitude e sair de dentro da nuvem, os motores foram religados em voo, levando a um pouso seguro. Há, porém, um caso notável de 2006, como indicam Guffanti *et al.* (2010), onde uma aeronave executiva modelo Gulfstream II voava sobre a Papua Nova Guiné a 39 mil pés (11.9 km) de altitude. Na descida para 24 mil pés, ambos os motores falharam e foram depois religados; a aeronave pousou em segurança. Após investigação nos motores, concluiu-se que um filtro em cada regulador de fluxo de combustível provavelmente ficou bloqueado por cinza que contaminou o combustível, que naquela altitude causou perda de fluxo, levando ao apagamento. Isso mostra como os efeitos podem se dar de forma diferente de degradação estrutural da aeronave, prejudicando um sistema vital para seu funcionamento, nesse caso o de combustível.

2.4 ÓRGÃOS INTERNACIONAIS DA AVIAÇÃO QUE LIDAM COM AS NUVENS DE CINZAS

Lechner *et al.* (2017) salientam que nem todos os vulcões existentes no mundo são monitorados e nem todos os países com vulcões possuem observatórios ou equivalente. Ainda assim há um esforço global para minimizar o risco de encontro de aeronaves com nuvens de cinzas. A estrutura sob a qual esse problema é gerenciado é o Observatório Internacional de Vulcões para aviação (IAVW, do inglês *International Airways Volcano Watch*), criado em 1987 pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional), que é o órgão máximo da aviação civil, e por ela administrado. A figura 6 mostra a localização, no globo, dos vulcões que deram origem a nuvens de cinza responsáveis por danos em aeronaves que com elas entraram em contato.



Figura 6: Mapa de vulcões responsáveis por encontros danosos de aeronaves com nuvens de cinza (LECHNER *et al.*, 2017).

Para contribuir com os esforços de observação, um sistema de escritórios de observação meteorológica, centros de controle de área e gerenciamento de tráfego e nove centros especializados em avisos de cinza vulcânica (VAAC, do inglês *Volcanic Ash Advisory Centre*), são responsáveis por observar, analisar, prever e comunicar o perigo à aviação, utilizando-se de técnicas e mensagens comuns em formato definido (LECHNER *et al.*, 2017). O sistema IAVW é composto pelos Estados

membros da OACI, e contém os nove centros VAAC que são os seguintes: Anchorage, Buenos Aires, Darwin, Londres, Montreal, Tóquio, Toulouse, Washington e Wellington. Suas respectivas áreas de responsabilidade são mostradas na figura 7.

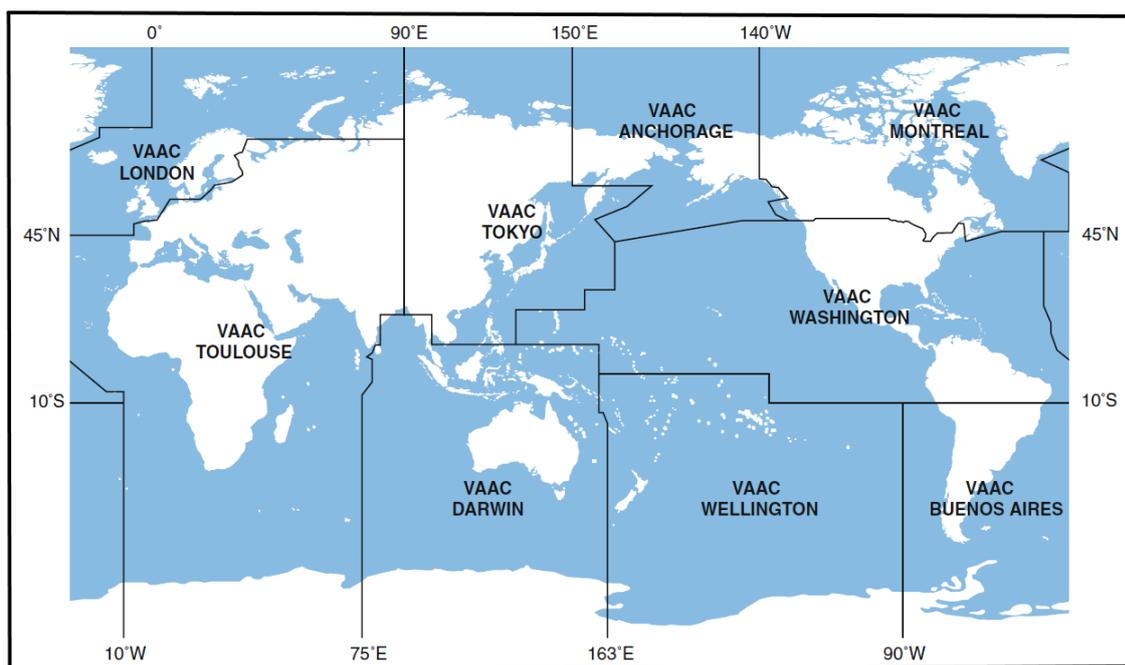


Figura 7: Áreas de responsabilidade dos nove VAAC (LECHNER *et al.*, 2017).

Para Guffanti *et al.* (2010), a estratégia de mitigação de risco para minimizar encontros danosos está na combinação de monitoramento em tempo real de vulcões e um ágil reporte de uma erupção, detecção e rastreamento de nuvens de cinza na atmosfera usando sensores baseados em satélite, modelagem de dispersão baseada em *software* para prever o movimento esperado de nuvens, e uma disseminação global de mensagens especializadas de alerta. Tais objetivos somente podem ser alcançados de forma efetiva em uma base global e conjunta de entidades da aviação e de áreas geológicas e de modelagem computacional.

2.5 RADAR METEOROLÓGICO E AS NUVENS DE CINZAS

Os órgãos reguladores da aviação exigem que as grandes aeronaves de passageiros carreguem a bordo algum equipamento de detecção de perigos ao voo. Pode ser um detector de relâmpagos ou um radar meteorológico, de acordo com Brown e Holt (2001). Radares meteorológicos no solo ou a bordo de aeronaves são usados na aviação civil primariamente para detecção e desvio de tempo associado a trovoadas, bem como para suplementar a tripulação com informações de suporte à navegação e evitar colisão com o solo. Ainda segundo os autores, o radar de bordo é uma ferramenta que aumentou muito a capacidade das aeronaves de evitar tempestades e trovoadas.

Radar é um acrônimo para rádio detecção e mapeamento, do inglês *radio detection and ranging*. Como explicam Brown e Holt (2001), um transmissor e um receptor são usados em conjunto para medir distância e direção de alvos através do uso de ecos de ondas de rádio. Um pulso de energia de rádio de alta frequência é transmitido da antena e viaja à velocidade da luz até que atinja algo, tal como gotas de chuva, que refletem um pouco da energia de volta para a antena. O receptor radar detecta e mede a intensidade do retorno, que é então exibida como uma área brilhante ou colorida na tela de radar da aeronave. A intensidade do retorno no radar dá indicação da severidade do tempo: se muita energia é refletida de volta, precipitação forte é indicada naquele local, indicando uma possível trovoadas.

O radar calcula distância, ou amplitude, pela medição do tempo de ida e volta do sinal ao alvo. Desde que a velocidade do sinal de rádio seja sabida, é relativamente simples para a unidade determinar quão longe o alvo está à frente da aeronave, bem como sua direção. As antenas transmitem um raio de energia em formato de cone, parecido com o feixe de luz de uma lanterna, com seu diâmetro aumentando com a distância. Para cobrir uma área maior com o feixe do radar, um motor elétrico move a antena para os lados no plano horizontal (BROWN e HOLT, 2001). Há alguns radares que também oferecem a possibilidade de varredura da antena no plano vertical, movendo-a para cima e para baixo. Quanto maior o tamanho da antena, maiores a potência e o alcance do radar.

Gotas de água em uma tempestade possuem tamanho relativamente grande e refletem bem as ondas de rádio lançadas pelo radar meteorológico, o que faz com que sejam exibidas de forma satisfatória para a tripulação, como mostra a figura 8. Com base nessas informações, a tripulação consegue evitar formações meteorológicas significativas, tomar decisões relacionadas à rota de voo e possíveis desvios necessários. A tecnologia empregada nesses radares de bordo, no entanto, não é

suficiente para que sejam capazes de identificar nuvens de cinza vulcânica porque suas partículas são muito pequenas para refletir as ondas de rádio, como indica Lima (2013).



Figura 8: Formações meteorológicas exibidas pelo radar de bordo de uma aeronave comercial (MANNO, 2013).

As nuvens de cinzas podem causar sérios danos à estrutura da aeronave e distúrbios à sua operação, no caso de uma tripulação voar inadvertidamente através delas. Há esforços multilaterais de vários países para amenizar os danos à atividade aérea, mas ainda há muito o que avançar em termos de prever, detectar e acompanhar uma erupção e a nuvem de cinzas por ela criada, com vistas a alertar em tempo real e com exatidão uma tripulação em voo (BONADONNA *et al.*, 2012). Essa informação ajuda a evitar um acidente aeronáutico e transtornos à fluidez do tráfego aéreo mundial. No próximo capítulo serão tratadas as tecnologias desenvolvidas para tentar auxiliar na detecção de nuvens de cinzas.

3 IMPACTOS ECONÔMICOS À ATIVIDADE AÉREA E TECNOLOGIAS PARA MITIGAR OS EFEITOS À AVIAÇÃO

Além de oferecer riscos à integridade estrutural de uma aeronave em voo, as nuvens de cinza vulcânica também representam um potencial considerável para causar grandes danos econômicos à aviação (CHRISTMANN *et al.*, 2015). As organizações que lidam com a aviação têm empregado esforços para desenvolver tecnologias no sentido de lidar com esse fenômeno e buscar respostas sobre possíveis gargalos na comunicação de sua ocorrência às tripulações durante o voo.

3.1 DANOS ECONÔMICOS À ATIVIDADE AÉREA

Mazzocchi *et al.* (2010) afirmam que as erupções de Abril de 2010 na Islândia, que trouxeram sérios distúrbios para o tráfego aéreo europeu, levaram as autoridades da aviação dos países afetados a declarar a maior parte dos céus europeus como zonas de voo proibido por cerca de uma semana. Baseados em informações disponíveis, os autores afirmam que o impacto na indústria de viagens aéreas foi maior inclusive do que aquele causado pela suspensão do tráfego aéreo dos Estados Unidos após os ataques terroristas de 11 de setembro de 2001. Guffanti *et al.* (2010) destacam que os vastos efeitos dessas mesmas erupções sobre a Europa e a região do Atlântico Norte posteriormente amplificaram os interesses em entender o risco potencial de encontros de aeronaves em voo com cinza vulcânica.

O interesse da mídia de massa por esse tipo de evento, aliado à percepção de risco aumentado por parte dos viajantes, pode alterar o comportamento econômico. Assim, mesmo após os distúrbios cessarem, enquanto as operações aéreas voltam ao normal, pode ser que potenciais passageiros aéreos decidam cancelar sua viagem ou alterar o modo de transporte para o país de destino, como apontado por Mazzocchi *et al.* (2010). Esse é um impacto econômico difícil de mensurar na indústria aérea. Outros ramos da indústria poderiam se beneficiar da erupção vulcânica, no curto prazo, como o de trens e aluguel de carros. Por outro lado, como indicam os autores, outros ramos de indústrias além dos próprios operadores aéreos também foram negativamente afetados pelos distúrbios, como serviços de correio, de carga aérea ou indústrias que dependem do transporte aéreo para traslado de produtos perecíveis.

Em termos operacionais, nos dias 17 e 18 de abril de 2010, dezessete países membros da União Europeia tiveram fechamento total de seus espaços aéreos, dois Estados Membros tiveram fechamento parcial e seis Estados não europeus

também tiveram fechamento total do espaço aéreo. Quando se fala em impactos econômicos, a perda de receita para operadores aéreos em todo o mundo com relação a serviços programados foi estimada em 2.6 bilhões de dólares americanos e outros 1.6 bilhões de dólares deixaram de ser gastos por visitantes e turistas no mundo (OXFORD, 2010). Houve ainda cem mil voos comerciais cancelados nesse período. A figura 9 mostra a extensão dessa nuvem de cinzas sobre a Europa em abril de 2010, os aeroportos em vermelho tiveram todos os seus voos cancelados; em amarelo, aeroportos que tiveram parte de seus voos cancelada.

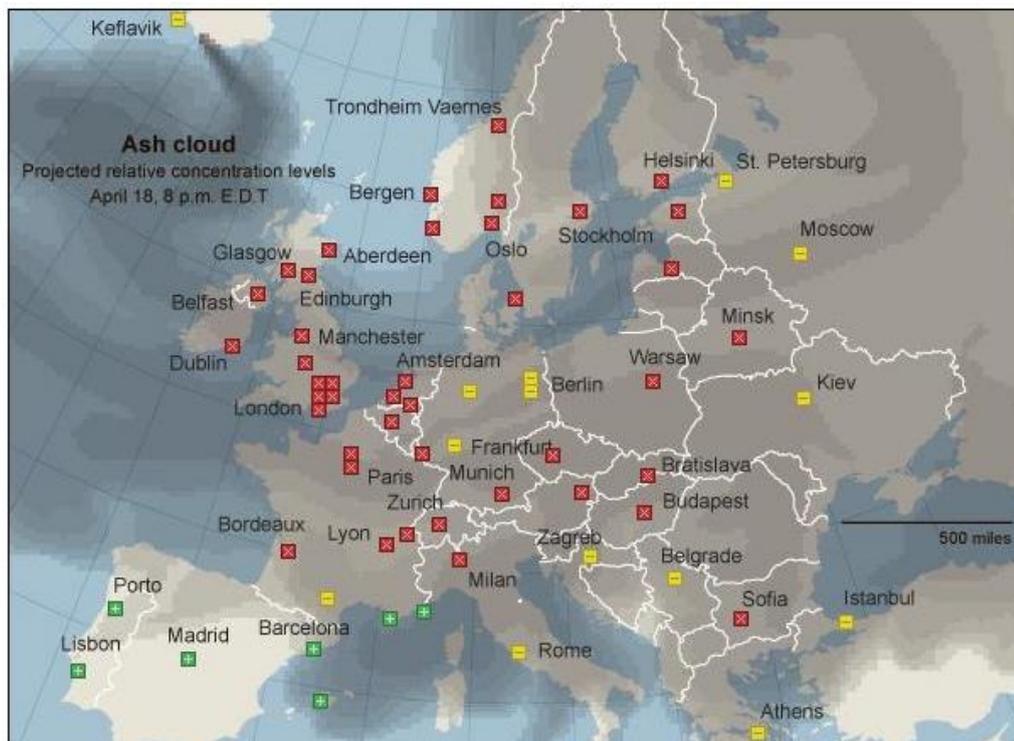


Figura 9: Amplitude da nuvem de cinzas do vulcão Eyjafjallajökull na Islândia que atingiu a Europa em 2010 (BRANDT, 2010).

Quando considerada toda a extensão dos danos econômicos, incluindo aí setores fora da aviação, as estimativas gerais para as perdas geradas pelas erupções de 2010 da Islândia chegam a cerca de 4.7 bilhões de dólares em um mês, segundo estudo da Oxford (2010). O ápice dos distúrbios foi de 313 aeroportos fechados simultaneamente na Europa, representando cerca de 75% da rede aeroportuária europeia. Esses dados citados se referem apenas às erupções da Islândia de 2010, pois além disso, Lechner *et al.* (2017) reforçam que há centenas de milhões de dólares contabilizados em danos a aeronaves em voo devido a encontros com cinza.

3.2 TÉCNICAS E TECNOLOGIAS PARA MITIGAR OS EFEITOS DAS NUVENS DE CINZAS NA AVIAÇÃO

Fica a cargo de cada Estado o direito de restringir ou proibir temporariamente o voo sobre parte ou todo seu respectivo território (ICAO, 2016). A resposta a um evento vulcânico que impacta o tráfego aéreo está dividida em quatro fases, de acordo com a OACI: Pré-erupção, quando se espera que haja uma erupção vulcânica, podendo ser omitida esta fase no caso de uma erupção inesperada. Início da fase de Erupção, quando há informação de que o fenômeno teve início. Fase de erupção em andamento, começa com a disseminação do primeiro aviso sobre cinza vulcânica contendo informação da extensão e previsão do movimento da nuvem. Por último, fase de recuperação, que se inicia com o primeiro aviso “sem cinza vulcânica esperada”, é a fase em que a atividade vulcânica retornou ao seu estado de não erupção, e não há mais ou não se espera partículas na atmosfera.

Há um índice de severidade para incidentes envolvendo partículas vulcânicas e aeronaves em voo que dá um panorama sobre possíveis efeitos na estrutura, mas segundo Christmann *et al.* (2015), há mais efeitos conhecidos do que aqueles listados, e alguns especialistas defendem a revisão deste índice. Os autores ainda afirmam que obter informação detalhada de ocorrências passadas pode contribuir para evoluir o gerenciamento de tráfego aéreo como um todo, portanto membros da tripulação e outras pessoas na aviação são encorajados a reportar esse tipo de evento. Para que relatos de encontros com nuvens de cinzas ou gás sejam consistentemente armazenados, é preciso estabelecer um sistema de reporte bem conhecido, onde as pessoas saibam onde reportar e quais informações são relevantes. Essa tarefa deve ser feita preferencialmente por uma organização independente e bem conhecida.

Uma tripulação de voo pode detectar cinza na atmosfera de várias formas: visualmente, por reporte de aeronave à frente, cinza ou poeira na cabine, odores ácidos, aumento na temperatura dos gases de escape do motor ou sombra criada por luzes de

pouso diferentes das observadas em nuvens comuns. A OACI, em seu documento de 2016, destaca que a tripulação ao encontrar nuvem de partículas pode ter de lidar com alguns problemas dependendo da severidade, como A) poeira na cabine, obrigando-lhes a usar máscara de oxigênio, o que diminui a clareza nas comunicações por voz; B) mal funcionamento dos motores, que poderão inclusive apagar; C) efeitos abrasivos em janelas e luzes de pouso levando a perda de visibilidade durante aproximação e pouso; D) tubos de pitot ficarem entupidos, fazendo com que informações de velocidade se tornem não confiáveis. Essas complicações podem trazer grande carga de trabalho para a tripulação (ICAO, 2016).

As recomendações oficiais, para o caso de uma tripulação encontrar cinzas durante o voo, são reduzir a potência dos motores para *idle* (marcha lenta), porque menos partículas serão ingeridas e depositadas no motor e a temperatura na seção de combustão será menor. Para manter a velocidade necessária ao voo, a aeronave deverá descer. Essa descida deverá ser feita durante e após uma curva de 180 graus, ou seja, a tripulação fará uma descida em planeio voltando e saindo da nuvem, pelo mesmo caminho que nela entrou. Utilizar máscaras de oxigênio, se necessário, comunicar-se com a tripulação de cabine e os passageiros e, por fim, executar as várias ações necessárias para uma situação anormal e de emergência (ICAO, 2016).

3.2.1 Tecnologias testadas para detecção de partículas de cinza na atmosfera

Após os distúrbios das erupções de 2010 da Islândia, a companhia de linha aérea EasyJet começou a trabalhar em um sistema chamado AVOID (*Airborne Volcanic Object Identifier and Detector* – Detector e identificador de objeto vulcânico no ar). A tecnologia é instalada na própria aeronave e utiliza feixes de ondas infravermelho lançadas em direção à nuvem de cinzas, o que permite detectar plumas a até 62 milhas náuticas (aproximadamente 114 km) de distância à frente da aeronave. O sistema permite detectar partículas a alturas entre 5.000 e 50.000 pés (1,5 a 15 km de altura) e também dá um panorama sobre a concentração de cinzas no ar (ZOLFAGHARIFARD, 2013).

Uma outra tecnologia instalada a bordo da aeronave que poderia ajudar a diminuir os riscos para a aviação é o LIDAR (*Light Detection and Ranging* – medição e detecção por luz), que mede a distância para um alvo ao iluminá-lo com pulsos de laser ultravioleta, medindo o pulso refletido com um sensor. Diferenças no tempo de retorno do laser e comprimentos de onda são usados em cálculos para fazer uma representação 3D do alvo (NOAA, 2013). Essa tecnologia é bastante usada para coletar informações sobre o formato e características da superfície da Terra, bem como mapear o formato de objetos grandes, como mostra a figura 10.

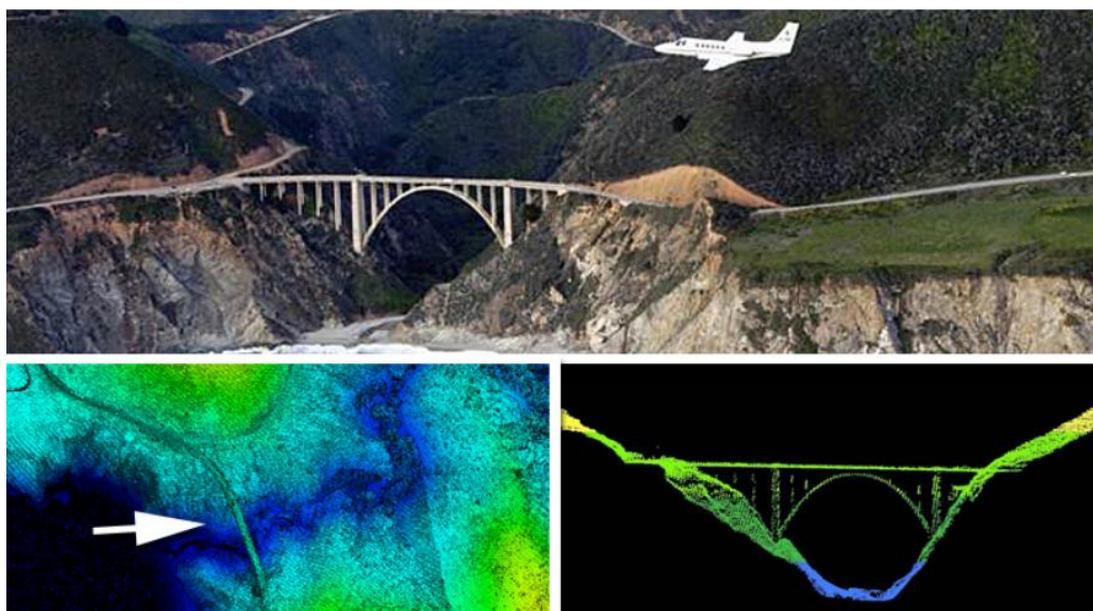


Figura 10: Imagem em 3D de uma ponte a partir de aeronave, usando a tecnologia LIDAR (NOAA, 2013).

Apesar de se apresentarem como tecnologias interessantes na detecção de cinza vulcânica em voo, os sistemas AVOID e LIDAR não estão implementados a nível operacional nas companhias aéreas. O motivo é que nos dois sistemas existe possibilidade considerável de haver falsa detecção de partículas de cinza. Nos dois casos, há indicação incorreta de cinzas quando há presença de poeira mineral, nuvens de gelo, fumaça e sulfatos em suspensão na atmosfera. Também poderá haver indicação errônea de ausência de cinzas no ar se estas estiverem misturadas com nuvens de maior altitude na atmosfera, como nuvens cirrus (FROMM, 2015). A confiabilidade dessas tecnologias ainda não alcançou o nível necessário para sua implementação na aviação de grande porte.

3.2.2 Modelo de previsão numérica de dispersão das nuvens de cinzas

Lechner *et al.* (2017) afirmam que introduzir e melhorar continuamente sistemas altamente tecnológicos para mitigar riscos econômicos e à segurança vindos de eventos naturais traz grandes desafios. No caso do risco vulcânico à aviação, os desafios incluem detectar a nuvem de cinzas, prever sua dispersão e comunicar a informação de forma precisa e em tempo.

Um modelo numérico de previsão meteorológica e um modelo de transporte e dispersão de cinza vulcânica são indispensáveis para que se alcance uma realidade onde se evite as cinzas (BONADONNA *et al.*, 2012). Membros da comunidade científica internacional que lidam com modelagem de dispersão das cinzas teriam a responsabilidade de desenvolver soluções que melhorem essa capacidade em escala global, para observar e caracterizar esse fenômeno em tempo real. Esse tipo de sistema é baseado em *software* e cálculos computacionais, mas as características que alimentam tal sistema como altura da nuvem e a massa das cinzas lançadas na atmosfera são afetadas por vários níveis de incerteza. Além disso, o comportamento aleatório do sistema natural e os erros de medições de campo podem trazer grandes erros na previsão, por isso os tomadores de decisão na aviação terão de lidar com estratégias probabilísticas, por vezes incertas (LECHNER *et al.*, 2017).

Para Bonadonna *et al.* (2012), é provável que haja pouca ou nenhuma informação no início de uma erupção, e um modelo de dispersão precisa ser alimentado por entrada de dados. Porém, ao longo do tempo a disponibilidade de informações tende a aumentar. Os avisos mais importantes para a aviação relacionados a previsão e detecção de cinzas na atmosfera são o VAA (*Volcanic Ash Advisory – Aviso de cinza vulcânica*) e o SIGMET (*Significant Meteorological Information – Informação meteorológica significativa*), e para avisos de maior duração, o NOTAM (*Notes to Airman – notas para o pessoal da aviação*). Lechner *et al.* (2017) destacam que não há atualmente padrões e procedimentos globalmente aceitos para a produção, distribuição e uso de cartas aeronáuticas que mostrem a concentração de nuvens de cinza vulcânica na atmosfera. Ainda é um desafio para a ciência determinar os constituintes, densidade e formato de uma nuvem vulcânica em momentos e locais exatos; é preciso reduzir essas incertezas.

3.3 A COMUNICAÇÃO DESSE TIPO DE EVENTO PARA O PESSOAL DA AVIAÇÃO

Reportes acurados e em tempo de informação relevante relacionada a perigos é uma atividade fundamental para o gerenciamento de segurança na aviação. Os dados usados para realizar análises vêm de várias fontes, sendo a mais importante o reporte direto do pessoal envolvido na atividade. Um requisito para tal é que esse pessoal esteja encorajado a relatar ocorrências que envolvam algum risco (ICAO, 2013). Mas os controladores de tráfego aéreo, por exemplo, podem estar muito ocupados para repassar mensagens que acreditem ter menor prioridade do que manter a separação requerida entre aeronaves. Outro ponto importante é que, nos anos recentes, o crescimento de mídias sociais tem indicado que notificações não oficiais de erupção e perigos podem ser disseminadas, levando a falsos alarmes ou mesmo informações conflitantes (LECHNER *et al.*, 2017).

Uma aeronave com motor a turbina pode viajar cerca de 150 km em dez minutos, e cinza vulcânica pode ascender aos níveis de voo dessas aeronaves em metade desse tempo (ICAO, 2016). É essencial uma resposta ágil à erupção que gera cinzas na atmosfera, bem como que a informação da atividade vulcânica seja disseminada o quanto antes. A forma como os avisos de partícula vulcânica para a aviação são gerados e disseminados é prescrita nos documentos PANS-ATM *Doc* 4444 e detalhada também no manual IAVW *Doc* 9766, e estão de acordo com o anexo três da OACI (Organização da Aviação Civil Internacional). Lechner *et al.* (2017) lembram que em 2014 uma aeronave teve contato com cinzas durante o voo, após a erupção do vulcão Kelut, e os avisos não chegaram à tripulação.

O Centro de Informação de Voo (ACC, do inglês *Area Control Center*) serve durante a erupção como conexão crítica para comunicação entre a aeronave em voo afetada e os provedores de informação. A OACI, em seu documento de 2016 para plano de contingência nessas situações, reforça que em áreas onde vulcões não são monitorados por observatórios, tecnologias de sensoriamento remoto, como observação por satélites, e reporte de pilotos são a principal fonte de informação sobre partículas na atmosfera. Para tal, tripulações de voo precisam saber transmitir observações de atividade vulcânica para os órgãos apropriados. Isso ajuda a melhorar a base de conhecimento dos VAAC, para diminuir as restrições para operações aéreas ao mínimo possível. É preciso também ter um arranjo com os Estados que possuem infraestrutura para verificar a situação atual da nuvem na atmosfera.

Cinza na atmosfera pode resultar em muitas aeronaves tendo suas rotas alteradas para áreas adjacentes não afetadas, sendo necessário que os órgãos e Estados envolvidos tenham capacidade de acomodar e revisar o fluxo de tráfego, quando necessário, de forma segura e eficiente (ICAO, 2016). É necessário um bom gerenciamento para que o risco à atividade aérea seja mitigado a um nível aceitável, de modo que os transtornos gerados não tragam custos tão elevados (ICAO, 2013).

Segundo Lima (2013), apenas parte dos 500 vulcões ativos ao redor do planeta é monitorada continuamente; e por questões técnicas, nem todas as áreas afetadas pela cinza vulcânica são detectadas pelos satélites meteorológicos e, além disso, os atuais radares embarcados nas aeronaves ainda não são capazes de detectar as partículas de material em voo. É essencial um grande nível de harmonização global para haver a consistência desejada na informação (ICAO, 2016). As erupções consecutivas de 2010 que afetaram a Europa não se configuraram necessariamente em um problema de comunicação devido à enorme magnitude de seus efeitos, que colocaram todo aquele continente em alerta máximo durante aproximadamente uma semana. O problema mais relevante à segurança de voo são aquelas erupções esporádicas e inesperadas.

Lechner *et al.* (2017) afirmam que as prioridades futuras do IAVW são focadas em melhorar a comunicação antes e bem no início da produção de cinza, além de melhorar a disseminação de informação e sistemas de alerta para ajudar a reduzir o

impacto econômico para a aviação. Os serviços do IAVW podem ser divididos em quatro áreas: (1) monitorar informações da ameaça, início, fim, escala e características de uma erupção, (2) monitorar as cinzas na atmosfera, (3) prever a trajetória esperada e local da nuvem e (4) comunicar a informação aos usuários da aviação. Ainda para Lechner (*et. al.* 2017), antes e durante a erupção, a coordenação e o fluxo de informação são prioridades, informando o local e previsão da evolução do fenômeno. Envolve cooperação entre os provedores da informação, nesse caso os VAAC, e os tomadores de decisão operacional.

4 CONCLUSÃO

Não há registro de fatalidades associadas a aeronaves operando próximas a nuvens de cinza vulcânica. Entretanto, aeronaves ainda não são totalmente capazes de evitar contato com essas nuvens. Esse fenômeno natural significa para a aviação não somente risco à segurança, mas também danos econômicos, ainda que um encontro de aeronave com uma nuvem desse tipo não resulte em acidente aeronáutico.

Nas ocorrências de encontro entre aeronaves e nuvens de cinza, os membros da tripulação não tiveram conhecimento da erupção, tampouco da nuvem propriamente dita, mesmo aquela tendo se iniciado várias horas antes do incidente. Usar as tecnologias atuais para prevenir danos econômicos e à segurança advindos de tal fenômeno é tarefa que precisa contar com a participação de várias agências dentro e fora da aviação. Mesmo com o advento de ferramentas como GPS e equipamentos modernos de comunicação de dados, ainda é um desafio informar tripulações em voo em tempo real sobre a ocorrência e desenvolvimento desse fenômeno natural.

É preciso que haja esforços no sentido de diminuir as discontinuidades que existem na comunicação desses eventos para a tripulação, para evitar que haja danos à estrutura da aeronave, podendo ocorrer um desastre. Discontinuidades existem devido à dificuldade que há em prever com precisão uma erupção vulcânica, já que nem todos os vulcões são monitorados por órgãos especializados. A grande preocupação são as erupções esporádicas e imprevisíveis que em questão de horas podem produzir grandes nuvens que gerem risco à segurança aérea ou transtornos para a aviação.

Prever a dispersão de cinzas na atmosfera somente é possível com a colaboração de diferentes disciplinas científicas e agências operacionais nos níveis nacional e internacional. O tráfego aéreo mundial tende a crescer a longo prazo, então é preciso permitir possíveis alterações no seu fluxo sem gerar grandes prejuízos à demanda de passageiros e carga. Futuras erupções vulcânicas ainda têm potencial de causar distúrbios significantes para o transporte aéreo, seja na segurança ou em perdas econômicas. Há espaço para o desenvolvimento nas áreas de procedimentos, ciência, engenharia e comunicação prática para melhor gerenciar o risco que as erupções vulcânicas oferecem à aviação.

Ainda é preciso que haja pesquisa principalmente nas áreas relacionadas à geologia, detecção e disseminação da informação relativa às erupções vulcânicas, para que essa informação chegue a tempo até a tripulação a bordo de uma aeronave. Conforme a aviação for recebendo cada vez mais tecnologia em suas rotinas operacionais, há uma tendência de que haja uma integração cada vez maior entre os vários órgãos responsáveis por gerenciar o fluxo de aeronaves em nível mundial, bem como uma integração com agências fora da aviação. Essa integração ainda precisa evoluir para que se alcance os objetivos de melhorar a segurança aérea com relação às nuvens de cinza vulcânica.

REFERÊNCIAS

- BARROS, Aidil J. da Silveira; LEHFELD, Neide A. de Souza. **Fundamentos de metodologia científica: um guia para a iniciação científica**. São Paulo: Makron Books, 2000.
- BONADONNA, Costanza; FOLCH, Arnau; LOUGHLIN, Susan; PUEMPEL, Herbert. *Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation*. *Bulletin of Volcanology*, 2012. Disponível em: <<https://archive-ouverte.unige.ch/unige:19463>> Acesso em: 04 set. 2017.
- BRANDT, Jorgen. *National Environmental Research Institute at Aarhus University, Dinamarca*. 2010. Disponível em: <http://m.fooyoh.com/iamchiq_living_lifestyle/4804156> Acesso em: 19 nov. 2018.
- BROWN, Gregory N., HOLT, Mark J. *The Turbine Pilot's Flight Manual*. 2ed. Iowa: Iowa State Press, A Blackwell Publishing Company, 2001.
- CASADEVALL, Thomas J. *U.S. GEOLOGICAL SURVEY BULLETIN 2047. Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*. Washington: United States Government Printing Office, 1994. Disponível em: <> Acesso em: 22 ago. 2017.
- CERVO, Amado L.; BERVIAN, Pedro A.; SILVA, Roberto da. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

- CHRISTMANN, C.; NUNES, R. R.; SCHMITT, A. R. *Recent encounters of aircraft with volcanic ash clouds*. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2015*, DocumentID: 370124, 2015. Disponível em: <<https://www.dglr.de/publikationen/2015/370124.pdf>> Acesso em: 26 set. 2018.
- FROMM, Mike. *7th International Workshop on Volcanic Ash (IWVA/7) 19-23 October 2015, Anchorage, Alaska*. 2015. Disponível em: <https://www.wmo.int/aemp/sites/default/files/P-30_FROMM.pdf> Acesso em: 22 out. 2018.
- GRINDLE, Thomas J.; BURCHAM, frank W. Jr. *Engine Damage to a NASA DC-8-72 Airplane from a High-Altitude encounter With a Diffuse Volcanic Ash Cloud*. 2003. Disponível em: <<http://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1161.pdf>> Acesso em: 09 set. 2017.
- GUFFANTI, Marianne; CASADEVALL, Thomas J.; Budding, Karin. *Encounters of Aircraft with Volcanic Ash Clouds: A compilation of Known Incidents, 1953-2009*. 2010. *U.S Geological Survey Data Series 545*. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/ds/545/DS545.pdf>> Acesso em: 13 set. 2018.
- ICAO – *International Civil Aviation Organization*. *Safety Management Manual (SMM)*. 3ed. Doc 9859, Montreal, Canadá, 2013.
- ICAO – *International Civil Aviation Organization*. *Volcanic Ash Contingency Plan, Europe and North Atlantic Regions*, 2ed, EUR Doc 019, NAT Doc 006, Part II, 2016. Disponível em: <<https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR+NAT%20VACP.pdf>> Acesso em: 16 out. 2017.
- LECHNER, Peter; TUPPER, Andrew; GUFFANTI, Marianne; LOUGHLIN, Sue; CASADEVALL, Thomas. *Volcanic Ash and Aviation – The Challenges of Real-Time, Global Communication of a Natural Hazard*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/11157_2016_49/fulltext.html> Acesso em: 10 set. 2018.
- LIMA, Gustavo Fernandes de. *Segurança de voo: o perigo da cinza vulcânica*. 2013. Monografia (Bacharel em Ciências Aeronáuticas) Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiás.
- MANNO, Chris. *Summer weather, Flight delays and you*. 2013. Disponível em: <<https://jethead.wordpress.com/2013/05/29/summer-weather-flight-delays-and-you/>> Acesso em: 19 nov. 2018.
- MAZZOCCHI, Mario; HANSSTEIN, Francesca; RAGONA, Maddalena. *The 2010 Volcanic Ash Cloud and its Financial Impact on the European Airline Industry*. Munique: Fórum CESifo, 2010. Disponível em: <<https://www.cesifo-group.de/DocDL/forum2-10-focus11.pdf>> Acesso em: 12 out. 2018.
- MINIER, Jean Pierre. *A General introduction to particle deposition*. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305673504_A_General_Introduction_to_Particle_Deposition> Acesso em: 15 set. 2018.
- NOAA, *National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S Department of Commerce*. *What is LIDAR?* 2013. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>> Acesso em: 12 nov. 2018.
- OXFORD ECONOMICS. *The economic impacts of air travel restrictions due to volcanic ash*. 2010. Disponível em: <<https://www.oxfordeconomics.com/my-oxford/projects/129051>> Acesso em: 23 out. 2018.
- SERVRANCKX, René. *What are the special hazards from volcanic ash?* 2016. Disponível em: <<http://chis.nrcan.gc.ca/volcano-volcan/haz-vol-en.php>> Acesso em: 14 nov. 2018.
- ZOLFAGHARIFARD, Ellie. *Easyjet tests 'AVOID' system that will allow pilots to fly during volcanic eruptions*. 2013. Disponível em: <<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2505453/Easyjet-tests-AVOID-ash-cloud-allow-pilots-fly-volcanic-eruptions.html>> Acesso em: 21 nov. 2018.

....