

# A Importância do Radar Meteorológico de Bordo na Prevenção de Acidentes Aeronáuticos da Aviação Geral

Moisés Vasconcelos da Costa<sup>1</sup>, Tammyse Araújo da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica de Goiás

**RESUMO:** Este estudo pretende apresentar a importância do radar meteorológico a bordo das aeronaves na aviação geral e caso a aeronave não tenha esse equipamento, a relevância em tê-lo a bordo. O valor desta pesquisa está justamente atrelado ao fato de que a aviação geral é a que mais possui ocorrência de acidentes aeronáuticos, causados principalmente pelo erro de julgamento do piloto. Em um primeiro momento, o estudo ancora-se em bibliografia específica sobre o surgimento do radar e como ocorreu a sua evolução. Entre os equipamentos derivados do radar, o meteorológico possui funções que auxiliam o piloto na tomada de decisão sob condições meteorológicas adversas ou nas fases críticas do voo como na aproximação para pouso. A apresentação de dados referentes a acidentes que ocorreram na aviação geral por más condições do tempo reforça a necessidade do amplo conhecimento sobre o radar meteorológico e a importância do piloto interpretar corretamente as suas informações, na perspectiva de que os riscos iminentes ao voo sejam mitigados e um acidente possivelmente evitado. Observa-se, portanto, o caráter funcional de segurança operacional do equipamento. Neste contexto, estabelece-se a relação entre radar meteorológico e segurança de voo, ao verificar quais informações são disponibilizadas para os pilotos e o que elas implicam para um voo mais seguro. Com a modernização nas cabines das aeronaves, substituíram-se os equipamentos analógicos pelos digitais, o resultado foi a carência de treinamento específico para utilização correta destes equipamentos na aviação geral, inclusive do radar meteorológico. É primordial a busca pelo treinamento eficiente para o uso deste dispositivo tão peculiar que pode reduzir os índices de acidentes causados por erro de julgamento do piloto.

**Palavras chave:** Acidentes Aeronáuticos, Meteorologia Aeronáutica, Radar Meteorológico, Segurança de Voo.

## Importance of Airborne Weather Radars for the Prevention of Aircraft Accidents in General Aviation

**ABSTRACT:** This study intends to present the importance of meteorological radars onboard general aviation aircraft and, should an aircraft not have such equipment, the relevance of having it installed. The value of this research is precisely related to the fact that general aviation is the one with the largest number of aeronautical accidents, caused mainly by the error of judgment on the part of the pilots. At a first moment, the study is anchored in specific bibliography about the advent of radar and its evolution along the years. Among radar-derived equipment, weather radars have functions that assist the pilot in making decisions under adverse weather conditions or during critical flight phases such as in the approach to land. The presentation of data relative to general aviation accidents that occurred due to poor weather conditions reinforces the need for a comprehensive knowledge of meteorological radars and how important it is for the pilot to correctly interpret information provided by them, so that imminent risks to the flight are mitigated and an accident possibly prevented. Therefore, it is possible to observe the equipment's operational safety functional feature. In this context, one establishes the relationship between meteorological radars and flight safety by checking which pieces of information are made available to pilots and what they imply for the obtainment of a safer flight. With the modernization of the aircraft flight decks, analog pieces of equipment have been replaced with digital ones, and the result was the lack of specific training for the correct use of such equipment in general aviation, including meteorological radars. Seeking efficient training in the use of this peculiar device is primordial, since it can reduce the number of accidents caused by error of judgment on the part of the pilots.

**Key words:** Aircraft Accidents. Aeronautical Meteorology. Weather Radar. Flight Safety

**Citação:** Costa, MV, Silva, TA. (2016) A Importância do Radar Meteorológico de Bordo na Prevenção de Acidentes Aeronáuticos da Aviação Geral. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 7, No. 1, pp. 72-81

### 1 BIOGRAFIA

#### Moisés Vasconcelos da Costa

Discente do último período do Curso de Ciências Aeronáuticas pela Escola de Gestão e Negócios da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Qualificado como piloto privado em aeronaves de asa fixa, desde o ano de 2013. Participou de diversos eventos sobre aviação, entre eles, a IV Jornada Latino-Americana de Fatores Humanos e Segurança Operacional, realizada pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, em Brasília no ano de

2015. E também em 2015, compareceu no Seminário Técnico de Aeronavegabilidade – SAERTEC, efetuado pela Agência Nacional de Aviação Civil, em Goiânia. E colaborou como voluntário na Jornada de Cidadania realizada pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás em Goiânia, no ano de 2016.

#### Tammyse Araújo da Silva

Especialista em Docência Universitária. Professora da Escola de Gestão e Negócios no curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Membro do Núcleo Docente Estruturante desde 2010. Coursou

Meteorologia por Satélite Aplicada à Aviação, EAD, em 2011 pelo INPE. Elemento Credenciado pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Credenciada no Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional pela Agência Nacional de Aviação Civil. Possui curso de Piloto Comercial/IFR. Lecionou na Escola de Aviação Civil, AHV, entre 1997 e 2000, para Piloto Privado de Avião, Piloto Comercial/IFR de avião e Comissário de Voo. Desde 2001 é professora do ensino superior em aviação.

## 2 INTRODUÇÃO

No decorrer da história da aviação, tanto as aeronaves quanto suas tecnologias passaram por transformações. Tais modificações tiveram como influência adaptações internas, como a evolução dos motores, e aos fatores externos do avião, como as condições meteorológicas. Estas, por vezes, intervêm na navegação aérea e faz necessário uma análise assertiva por parte dos pilotos.

Neste propósito, a tecnologia teve que avançar na busca de instrumentos que se apropriassem dos aspectos externos e os transformassem em informações úteis para que os pilotos as utilizassem como apoio à segurança de voo. Daí a necessidade de equipamentos com vistas à meteorologia que auxiliassem os aviadores nas diversas fases do voo.

Em meados do século XIX, estudos e experimentos fundamentaram as teorias que tornaram possível o desenvolvimento do radar, que é um sistema capaz de localizar alvos por meio de ondas eletromagnéticas. Entre 1939 e 1945, período da Segunda Guerra Mundial, este dispositivo foi aprimorado e, como resultado, avançou-se nas detecções de aviões bombardeiros, fator crucial para conflitos bélicos.

Em consequência deste avanço, o radar teve grande importância, principalmente no período pós-guerra. Assim criou-se sistemas para o controle de tráfego aéreo com radares primário e secundário. Ainda, seu uso foi derivado para significativos meios que contribuem para segurança, entre eles está o sistema de detecção das condições meteorológicas adversas durante o voo, conhecido como radar meteorológico.

Abstraindo-se da necessidade de treinamentos especializados na aviação geral, este artigo tem o objetivo de demonstrar como o radar meteorológico contribui para a segurança de uma aeronave e a prevenção de acidentes aeronáuticos ocasionados por fenômenos meteorológicos. E, caso a aeronave tenha este equipamento acoplado, o quão importante é o treinamento específico para se evitar erros na interpretação das informações disponibilizadas.

É neste contexto que o estudo pretende contribuir para a conscientização dos pilotos que trabalham na aviação geral sobre a necessidade do treinamento para a qualificação técnico-operacional, principalmente no uso do radar meteorológico, com a intenção de auxiliá-los nas tomadas de decisões quando as condições meteorológicas forem

desfavoráveis e alcançar maiores níveis de segurança nas operações aéreas.

A pesquisa está fundamentada em referenciais teóricos especializados nas áreas de segurança de voo e operacional, tecnologia, história, meteorologia, dentre outras, embasados em 6 livros, 6 artigos, 3 manuais, 3 relatórios de dados estatísticos e acidentes, 2 monografias, uma enciclopédia e um site. E para validar a importância do radar meteorológico embarcado nas aeronaves, realizou-se a análise de dados e estudo de caso, com a finalidade de prevenção, disponibilizados pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, das estatísticas e relatórios de acidentes e incidentes aeronáuticos conexos à meteorologia.

O artigo está estruturado em quatro segmentos. No primeiro, serão contextualizados a evolução e o desenvolvimento do radar desde sua concepção inicial até a sua utilização para fins meteorológicos e, em seguida, serão apresentadas as funções básicas e a operação deste equipamento. A segunda e terceira partes relacionam este dispositivo à segurança de voo ao identificar os possíveis tipos de detecções, além de reforçar a importância do treinamento na compreensão totalitária do radar, ressaltando as limitações e deficiências que dele podem resultar. Para finalizar, a exposição de dados sobre as estatísticas dos acidentes ocorridos entre 2005 e 2014 enfatizam aqueles que aconteceram por fenômenos meteorológicos. Destes, dois foram estudados na intenção de mostrar a relevância do conhecimento do equipamento como ferramenta na prevenção de acidentes.

Portanto, no estudo pretende-se investigar como o nível de qualificação dos pilotos para o uso do radar meteorológico interfere nas questões relativas à prevenção de acidentes aeronáuticos. Sabe-se que nesta prevenção existem três elementos - a tecnologia, o treinamento e os regulamentos - que, quando em perfeita harmonia, mitigam a possibilidade de um sinistro. É notório que tanto a máquina quanto o homem são passíveis de falhas, principalmente este último, representante do treinamento e dos regulamentos. Se torna, portanto, imperativo conhecer a máquina e o homem, suas limitações e deficiências e, reforçar, neste sentido, que as prerrogativas oriundas dos radares meteorológicos, dependendo do seu uso, podem ou não embasar aquela harmonia pretendida.

## 3 RADAR

O radar é considerado hoje como um instrumento indispensável à segurança operacional no âmbito da aviação, seja ele destinado ao controle de tráfego aéreo ou à cobertura das condições meteorológicas.

### 3.1 Histórico do radar

O princípio de funcionamento e desenvolvimento do radar ocorreu, de acordo com Sanfuentes (2000), a partir de estudos realizados sobre as ondas eletromagnéticas. Em 1864, o físico inglês Maxwell desenvolveu equações matemáticas

para demonstrar como era o comportamento destas ondas. De acordo com IAC (2003) em 1886, o físico alemão, Heinrich Hertz, utilizou as equações de Maxwell para evidenciar experimentalmente como as ondas eletromagnéticas se propagavam pelos meios espacial e terrestre.

O princípio de propagação das ondas eletromagnéticas passou a ser estudado por diversas nações com o intuito de aprimorar novos equipamentos. Em 1903, o investigador alemão Christian Hulsmeyer foi capaz de detectar ondas eletromagnéticas que se refletiam quando em contato com os navios, a cerca de 1 milha náutica. Em 1904, ele reuniu uma equipe com o intuito de auxiliar os navios em navegações e evitar colisões (SANFUENTES, 2000).

Sanfuentes (2000), descreve que, em 1915, o engenheiro inglês, Robert Watson-Watt passou a aprimorar seus conhecimentos na área das ondas eletromagnéticas, com a intenção de alertar os pilotos sobre as condições adversas de tempo. Em 1924, Watson-Watt foi destinado pelo Instituto de Estudo de Rádio<sup>1</sup> a realizar uma série de experimentos até que em 1935, ele detectou um avião a uma distância de 15 milhas náuticas. Em primeiro de setembro de 1935, através de um equipamento aprimorado, o mesmo rastreou um bombardeiro distante 40 milhas náuticas. Seu aparelho de detecção foi denominado *Radio Detection Finding* (RDF) e, mais tarde, ficou conhecido como RADAR, abreviatura do inglês *Radio Detection and Ranging*, cujo nome é utilizado até hoje.

Sanchez-Rocha (1972), relata que os ingleses trabalhavam em um projeto de grande escala, com o objetivo de detectar objetos que voassem sobre o Canal da Mancha. Conforme Miguens (2000), em 1936, a Inglaterra desenvolveu um radar que alcançava 35 milhas náuticas e segundo Sanfuentes (2000), com o aprimoramento deste equipamento, os ingleses visavam instalar um radar a bordo de uma aeronave com intenções de fornecer visão noturna e aprimorar a vigilância realizada pelos aviões.

O primeiro avião com um radar instalado foi o AVRO K6260, em 17 de agosto de 1937, que possuía uma potência de 100 Watts. Mais tarde, em 1939, em 24 aviões *Hudsons* e 25 aviões *Sunderlands* foram instalados radares ASV, que elevaram o alcance da detecção com o aumento de altitude das aeronaves. Apesar do equipamento não ser tão confiável, ele fornecia apoio a navegação aérea (SANFUENTES, 2000).

De acordo com Sanchez-Rocha (1972), no decorrer da Segunda Guerra Mundial, os equipamentos de radar passaram por aprimoramento. A intensificação de sua evolução foi graças a união científica entre os norte-americanos e ingleses, em 1940 e 1941, na qual, os estadunidenses tinham que controlar seus navios e os britânicos tinham que detectar

aviões inimigos e instruir seus próprios aviões em missões de guerra. Sanfuentes (2000) complementa que o físico inglês, Robert Sutton, desenvolveu na década de 1940 um equipamento emissor e receptor de ondas eletromagnéticas, o *Soft Sutton Tube*.

Em 1946, se criou o *Travelling Wave Tube* (TWT), que era um amplificador e modulador de ondas eletromagnéticas. Com o TWT foi possível ter uma menor potência para emissões de sinais, o que reduziu o custo e aprimorou a operação do equipamento. Após o desenvolvimento dos modernos computadores, obteve-se melhores sinais de ondas, mesmo em ambientes hostis (SANFUENTES, 2000).

### 3.2 Radar Meteorológico

O radar destinado à meteorologia teve seu avanço tecnológico conforme eram desenvolvidos os radares voltados para aplicações bélicas. Os primeiros indícios de detecção do tempo foram realizados, de acordo com Whinton (1998), entre o período de julho de 1940 e fevereiro de 1941, por meio de um equipamento inglês operado pelo *General Electric Corporation Research Laboratory*.

Desde 1942, foram concretizados pelos físicos do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT)<sup>2</sup> os primeiros estudos que comprovaram a possibilidade de realizar detecções das condições meteorológicas com um radar que funcionasse com o comprimento de onda entre 3 e 10 centímetros. Após isso, foi estabilizado um programa pelo Serviço Meteorológico da Força Aérea Armada do Estados Unidos que visava utilizar o radar para detecções meteorológicas (WHINTON, 1998).

Na década de 1940, consolidou-se que o uso dos radares, até então voltados para a guerra, poderiam auxiliar na vigilância das condições meteorológicas. Segundo Morales (2013) os norte-americanos, a partir de setembro de 1943, passaram a utilizar os radares instalados no Panamá para fins meteorológicos, efetuando estudos e observações sobre pontos específicos e as propagações de ondas na atmosfera.

A primeira rede de radares para vigilância meteorológica foi abrigada em 1944 no Panamá com duas instalações em *Harbor Defense Cristobal*, de frente para o Atlântico. Essa rede tinha o intuito de fazer observações e emitir relatórios meteorológicos. A segunda, com a mesma finalidade, foi instalada na Índia naquele mesmo ano. E também em 1944, foram realizadas modificações nas aeronaves estadunidenses do Segundo Esquadrão de Reconhecimento de Tempo que instalaram um conjunto de radares AN/APQ-13,2. Este modelo, originalmente utilizado para navegação aérea e auxílio em combates aéreos nas aeronaves B-17, B-24, B-25 e B-29, foi aprimorado para

<sup>2</sup> Instituto de Tecnologia de Massachusetts

<sup>1</sup> Mais tarde se fundiu com o Laboratório Nacional de Física.

detectar facilmente condições meteorológicas e foi instalado nas aeronaves e no solo (WHINTON, 1998).

Para Pamplona (2015) atualmente a utilização do equipamento a bordo de aeronaves traz confiabilidade nos dados fornecidos voltados para o planejamento e a realização da navegação aérea e é uma eficaz e primordial ferramenta em prol da segurança de voo.

### 3.2.1 Funcionalidades do radar meteorológico

Durante o voo, a aeronave está inserida em um ambiente suscetível a diversos fenômenos atmosféricos. De acordo com Kayton (1997) o radar meteorológico possibilita ao piloto evitar condições adversas de tempo porque os dados fornecidos por ele indicam quais os tipos de partículas na formação, como a chuva, granizo, neve, etc., e o teor da precipitação. Também permite a avaliação sobre turbulências ligadas a precipitação, causada principalmente por tempestades e variações na velocidade do vento. Porém, segundo Airbus (2007), não é possível detectar nuvens, nevoeiros e ventos.

O radar meteorológico possui o princípio de funcionamento similar ao radar convencional. De acordo com Eismin (2001) as frequências das ondas eletromagnéticas em que o radar trabalha são classificadas através de Bandas. De 1.000 a 2.000 MHz, a Banda L é a que possui menor frequência, enquanto que a Banda K, dispõe altas frequências, entre 18.000 a 26.500 MHz.

O conjunto estrutural básico do radar meteorológico é formado por um transmissor-receptor, um sistema que compõe a antena, dentro do radome<sup>3</sup> da aeronave e um indicador. Em funcionamento, o transmissor irá produzir os pulsos de ondas eletromagnéticas através das frequências de Banda C, de 4000 a 8000 MHz, ou X, de 8000 a 12000 MHz. Esses pulsos são gerados cronometradamente conforme a frequência e o comprimento de onda utilizado pelo radar. Os pulsos gerados são levados ao conjunto da antena que os emite para o espaço (EISMIN, 2001).

Há um ciclo de sincronização de sinais emitidos e recebidos, ou seja, se o transmissor está emitindo um sinal, há um bloqueio na recepção destes até o término da emissão. Quando as ondas entram em contato com a formação ou com algum objeto, é criada uma refletividade, ou eco. Essas ondas são captadas pela antena e entregues ao receptor (EISMIN, 2001). De acordo com Johnston (2007), o radar meteorológico da aeronave pode detectar estas condições meteorológicas a grandes distâncias, conforme a especificação do equipamento.

Eismin (2001) comenta que após capturadas, as ondas de rádio passarão por uma seção do transmissor-receptor, os dados recebidos serão processados, demonstrando a intensidade, a direção e distância das formações meteorológicas ou do mapeamento do solo. Essas

informações são repassadas a um indicador e mostradas na cabine por meio de uma tela digital.

Através do painel de controle, o piloto poderá controlar o funcionamento do radar meteorológico e as operações necessárias durante o voo. As principais funções do painel são: range control, gain control, stabilization control e tilt control. A função range control permite que o piloto selecione o alcance da detecção desejado. O gain control aprimora a sensibilidade do ganho dos sinais. O stabilization control fará a varredura da rota do avião paralelamente a terra, independente da atitude ou de sua inclinação lateral. E por fim, o tilt control que controlará verticalmente a ângulação da antena (EISMIN, 2001).

Eismin (2001) esclarece que o sistema do radar Doppler, acoplado ao conjunto do radar meteorológico de bordo, tem função principal de detectar a presença de turbulências durante o voo, assessorando o piloto na busca de rotas que torne o voo mais tranquilo. De acordo com Kayton (1997), esse sistema também detecta a presença de microburst que é um cisalhamento de vento vertical a baixa altura presente em nuvens Cumulonimbus e que pode ocorrer durante a decolagem e na aproximação de uma aeronave para pouso.

### 3.2.2 Operação do radar meteorológico de bordo

As informações contidas no sistema de radar meteorológico permitem que o piloto tenha uma leitura rápida, objetiva e clara dos dados contidos no painel (IAC, 2003). De acordo com Pamplona (2015), a severidade das formações é mostrada no display do radar por cores, sendo, em ordem crescente: verde, amarela, vermelha e magenta.

Segundo Eismin (2001), as cores indicadas na tela do radar meteorológico mostram que a cor verde exprime precipitação leve, a amarela simboliza precipitação moderada, a vermelha indica a presença de forte precipitação e formação de gelo e por fim, a cor magenta apresenta turbulências moderadas a severas. A Fig. 1 apresenta um exemplo da imagem no display de radar meteorológico de bordo utilizado na aviação geral.

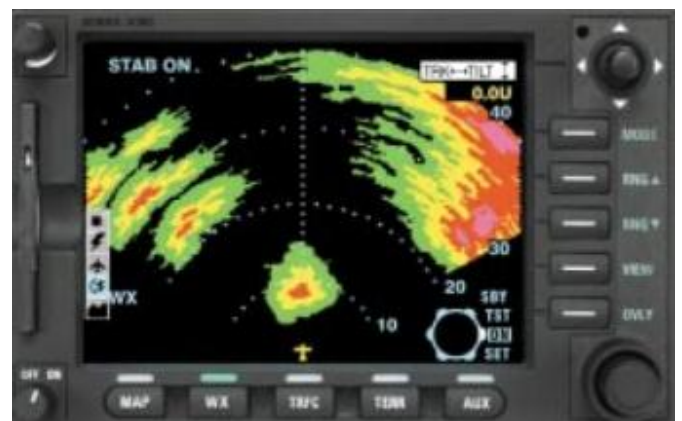


Figura 1: Radar meteorológico de bordo.

Fonte: Honeywell 2001.

<sup>3</sup> Cúpula protetora da antena de radar meteorológico.

A leitura correta do radar meteorológico depende da interpretação do piloto. Segundo Pamplona (2015) as cores apresentadas no display variam conforme o aumento da refletividade do eco em decibéis (dBZ) nas formações atmosféricas. O gráfico 1 apresenta esta relação.

| Nível | dBZ   | Tipo de precipitação  | Cor no radar     |
|-------|-------|---|------------------|
| 1     | 0-30  | Fraca   | Verde claro      |
| 2     | 30-41 | Fraca a moderada  | Verde escuro     |
| 3     | 41-46 | Moderada a intensa  | Amarelo          |
| 4     | 46-50 | Intensa   | Vermelho/Laranja |
| 5     | 50-57 | Muito intensa;<br>Possibilidade de granizo                                    | Vermelho escuro  |
| 6     | >57   | Muito intensa e granizo;<br>Possibilidade de grande<br>Intensidade de granizo | Magenta          |

Gráfico 1: Intensidade de precipitação.

Assim como as informações meteorológicas, os alvos detectados no solo por meio do modo mapeamento, também são identificados na tela do radar que possuem esta função por três cores: verde, amarelo e vermelho (IAC, 2003). No qual, conforme Bendix (1996), a mudança de cor ocorre com a proximidade da aeronave em relação ao solo.

Apesar dos radares meteorológicos possuírem o mesmo princípio de funcionamento cada equipamento tem suas próprias características, seus modos de funcionamento e suas limitações. O piloto deve constantemente estudar os manuais para reciclar o conhecimento do equipamento e, assim, poder operá-lo com propriedade (AIRBUS, 2007).

#### 4 CONTRIBUIÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO PARA A SEGURANÇA DE VOO

Ações realizadas pelos pilotos nas cabines de comando possuem elo direto com a segurança das operações. De acordo com Rodeguero (2013, p. 45), a segurança operacional é “um conjunto de medidas conscientes implantadas, que se destina a identificar, gerenciar, reduzir ou

eliminar riscos de operações aeronáuticas, através de todos os atores direta ou indiretamente envolvidos na operação”.

As atividades se tornam seguras quando os operadores realizam sequências de medidas responsáveis. Estas medidas devem ser executadas com o intuito de conhecer e ter melhor consciência do tipo de ação a ser efetivada, averiguando as iminências de perigos e riscos para proporcionar tomadas de decisões prudentes ao que se destina a promoção da segurança (RODEGUERO, 2013).

As aeronaves estão expostas em um meio onde há diversas mudanças meteorológicas, no qual, segundo Rodeguero (2013), os perigos, potencialmente, podem causar danos à atividade aérea, como uma nuvem de tempestade na rota. E os riscos são situações em que as aeronaves estão submetidas e que podem causar ameaças ou danos à sua integridade, como é o caso de um avião ao adentrar em nuvens de tempestades.

Para Santos (2013) diversos sistemas a bordo de aeronaves foram aprimorados pela necessidade de promover melhor a segurança do voo, e também, para propiciar a redução da carga de trabalho dos pilotos e tornar a operação mais confiável. Entre estes diversos equipamentos, o radar meteorológico é um grande colaborador para a prática do voo.

Segundo Ferreira (2010) além da segurança e estabilidade, este equipamento pode também contribuir com a economia do voo, pois, devido às fortes formações meteorológicas, são necessários desvios durante uma rota a ser voada. Para que esta circunavegação não seja executada de forma abusiva, o radar meteorológico propicia a escolha de rotas mais confiáveis e que ocasionem menores dispêndios.

##### 4.1 Condições meteorológicas detectadas

As formações mais perigosas à aviação estão presentes em nuvens Cumulonimbus, ou CB, que são as nuvens de tempestades causadoras de fortes precipitações, turbulências, presença de gelo e microbursts. O radar meteorológico permite que os pilotos obtenham informações destas condições meteorológicas em voo e realizem as medidas cabíveis para evitar qualquer risco a segurança da aeronave (MANSEN, 2011).

De acordo com Sonnemaker (2012) as formações das nuvens Cumulonimbus ocorrem a partir da elevada umidade, instabilidade atmosférica e das correntes ascendentes de ar. Estas nuvens passam por três estágios: Cumulus, Maturidade e Dissipação. O estágio de cumulus é o período em que ocorre a formação da nuvem. De acordo com Souza (2011) o segundo estágio, de maturidade, é o mais perigoso para a aviação, pois possui fortes correntes descendentes, descargas elétricas, rajadas à superfície e fortes turbulências, colocando em risco a aeronave no interior e no entorno da célula. Por fim, há estágio de dissipação, no qual ocorre a redução na sua intensidade em todos os seus aspectos.

A Airbus (2007) explica que ao ser indicado no radar meteorológico a presença desta formação, os pilotos têm

dados para realizar os desvios. De acordo com Souza (2011) devido ao efeito de Coriolis, no qual a rotação da terra interfere no movimento do ar, desvia-se para a esquerda no Hemisfério Sul e para a direita no Hemisfério Norte, quando um voo é realizado no Hemisfério Sul, partindo de Sul para o Norte, ao ser presenciado uma condição meteorológica adversa, os pilotos devem realizar desvios para a esquerda para evitar a penetração na formação. Essa interpretação seria ao contrário caso o voo fosse proveniente de Norte para o Sul.

Em CB acima de 15000 pés de altura até o topo da nuvem e com temperatura abaixo de zero grau Celsius, ocorrem chuvas misturadas a gelo e, ao entrar nesta formação, acontece uma resistência ao avanço, diminuindo a velocidade indicada da aeronave. Em grande parte dos casos, a intensidade da turbulência varia com a da precipitação. As turbulências podem estar presentes em até 21 milhas náuticas, desde o núcleo do CB. Por esse motivo, é recomendável um desvio mínimo de 20 milhas náuticas da nuvem. Além disso, nuvens muito intensas capazes de produzir granizo produzem ecos a distâncias maiores que 75 minhas náuticas que quando captados pelo radar da aeronave devem ser evitados (SONNEMAKER, 2012)

As informações captadas pelo radar meteorológico proporcionam meios para tornar o voo mais agradável, evitando áreas que prejudiquem o conforto dos passageiros e também colaboram para a execução de um voo seguro e econômico durante os desvios necessários.

## 5 A IMPORTÂNCIA DO TREINAMENTO PARA A CORRETA INTERPRETAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO

O treinamento específico para a operação do radar meteorológico proporciona o entendimento mais aprofundado desse equipamento. Considerando que durante um voo podem ocorrer em determinados momentos erros de interpretação, é necessário a leitura crítica do tipo de fenômeno encontrado e a realização das devidas correções pelos pilotos (MANSEN, 2010).

### 5.1 Ajustes do Tilt

O ajuste de inclinação da antena, ou Tilt, é o principal parâmetro a ser gerenciado durante a operação do radar meteorológico. De acordo com a Airbus (2007), durante o voo devem ser realizadas correções periódicas do tilt manualmente. Caso o equipamento possua auto-tilt, estas correções ocorrem automaticamente. Mansen (2010) acrescenta que se o ajuste de inclinação da antena for muito baixo, o radar irá captar em demasia os sinais de solo, dificultando a distinção das condições meteorológicas com o solo. Em contrapartida, se o ajuste for muito alto, o feixe de captação poderá ficar acima da formação. O ajuste eficaz do radar depende da distância entre a aeronave e a formação, da altura e da intensidade do ganho de sinais.

De acordo com Bendix (1996) a coloração das condições meteorológicas e do solo são muito semelhantes, e o que as tornam diferentes é a presença da cor magenta nas formações. A Airbus (2007) esclarece que devido a esta similaridade, alguns equipamentos possuem correções quando as aeronaves voam próximas ao solo, conhecidas como Ground Clutter Suppress (GCS). Quando o tilt é ajustado as informações do terreno podem mudar de cor ou desaparecer, mostrando apenas as condições meteorológicas.

Segundo a Airbus (2007), durante o voo reto, nivelado e em altitudes elevadas, os pilotos devem atentar-se para as correções do tilt para prover a leitura correta do equipamento caso se tenha nuvens Cumulonimbus na rota. Sendo assim, quando for detectado o topo desta nuvem, os ajustes do tilt com valores negativos deverão ser executados, para verificar o tipo, a altura e os locais mais perigosos da formação. A correção é necessária para evitar erros de interpretação.

### 5.2 Deficiências do radar meteorológico

O radar meteorológico tem maior capacidade de refletividade das formações meteorológicas com a presença de umidade, ou seja, reflete melhor a chuva, a neve e o granizo. Outra limitação é o efeito de sombra ou atenuação do radar. Tal efeito ocorre quando a informação mostrada no display é menos relevante e antecede uma condição mais crítica, camuflada pelo efeito sombra. Isso induz a tripulação a ingressar na região mostrada no display por acreditar que ela está livre de formações meteorológicas severas quando na realidade a área intensa está disfarçada pela atenuação das condições meteorológicas que a precede (WERTH, 2014).

A Airbus (2007) complementa que os sinais da parte posterior à formação poderão aparecer na tela com áreas em verde ou preto, indicando um falso local propício para o voo, conhecido como sombra do radar. Os pilotos devem interpretar que esta sombra é prejudicial ao voo. Segundo Mansen (2010), deve-se realizar desvios destas formações.

Os radares meteorológicos mais modernos possuem correções dos sinais atrás das nuvens que se suspeitam terem sido atenuados. Devido a estas limitações e deficiências, utiliza-se o radar meteorológico apenas para realizar desvios de condições adversas, e não para servir como equipamento para penetrar nestas formações (AIRBUS, 2007).

Werth (2014) completa que as indicações apresentadas no display do radar meteorológico mostram apenas a parte frontal da nuvem Cumulonimbus onde a precipitação é forte e intensa. Devido a esta severidade, as ondas emitidas não conseguem penetrar no interior da célula, tornando imprecisa a leitura do tamanho, formato e intensidade posterior a formação.

## 6 PANORAMA DE ACIDENTES OCORRIDOS NO BRASIL

De acordo com Ney Moscati (2005) um dos meios mais eficientes para aumentar a segurança na atividade aérea é através da análise e compreensão dos acidentes e incidentes

ocorridos. No Brasil, estas investigações são realizadas pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, ou CENIPA, que é responsável pela promoção da segurança de voo por seu efetivo trabalho investigativo e de prevenção de acidentes e incidentes aeronáuticos.

O panorama no Brasil dos acidentes e incidentes aeronáuticos ocorridos entre 2005 a 2014 revela que o maior índice desta estatística está relacionado com as ocorrências providas da aviação geral<sup>4</sup>, liderado pelo Serviço Aéreo Privado, com 44,10% dos acidentes e 29,80% dos incidentes aeronáuticos ocorridos (CENIPA, 2015).

Apesar dos acidentes aeronáuticos ocorrerem por um conjunto de fatores, o julgamento de pilotagem e a supervisão gerencial são os que mais contribuem para tais ocorrências, com 13,23% e 10,55%, respectivamente (CENIPA, 2015). Para Rodeguero (2013), esses índices seriam menores se houvesse maior padronização operacional durante os treinamentos dos pilotos, ressaltando suas habilidades na avaliação dos perigos e mitigação dos riscos iminentes.

Segundo Rodeguero (2013) apesar de todo o programa de treinamento teórico e prático concretizado durante a formação, os pilotos só realizam a gestão de emergência quando esta é real. A utilização de simuladores de voo aproxima o virtual da realidade e traz para o aprendizado situações anormais e emergenciais. Isto aprimora o treinamento, tornando-o eficaz perante situações adversas colaborando para tomadas de decisões precisas e em tempo hábil.

Apesar da contribuição da meteorologia apresentar menores índices se comparados aos fatores supracitados, neste período de 10 anos, cerca de 3,37% dos acidentes ocorreram devido às condições meteorológicas adversas (CENIPA, 2015).

### 6.1 Acidentes ocasionados por fenômeno meteorológico em voo

Foram coletados os dados do CENIPA exclusivamente sobre os acidentes que aconteceram no período de 2005 a 2014 no Brasil, cujo o fator principal foi o fenômeno meteorológico. Registraram-se 12 acidentes, os quais dez relacionados a aviões, um a helicóptero e outro com planador. Dentre estes acidentes, as aeronaves são da aviação geral e regular, entretanto, o estudo está voltado para aquelas da aviação geral e que possuíam a bordo o radar meteorológico.

Será realizado o estudo de caso de dois acidentes com a finalidade de prevenir novos acidentes e de comprovar a importância do treinamento eficaz para o uso do radar meteorológico, garantindo assim sua interpretação correta e auxiliar na tomada de decisão em condições meteorológicas adversas. Além disso, será demonstrado o quanto esse equipamento é relevante para um voo seguro.

O primeiro acidente ocorreu com uma aeronave modelo EMB-810D e matrícula PT-VRV, em primeiro de novembro de 2012 na Chapada dos Guimarães, Mato Grosso,

envolvendo 4 pessoas com lesões fatais. O segundo acidente refere-se a uma aeronave C-90A, de matrícula PT-WUG, no dia 12 de dezembro de 2010 em Londrina, Paraná, deixando 7 pessoas com lesões leves.

#### 6.1.1 Acidente com a aeronave PT-VRV

De acordo com o relatório final do CENIPA (2014), a aeronave havia decolado de Confressa, Mato Grosso, às 14h30min, com dois tripulantes e dois passageiros sem apresentar plano de voo e com destino a Cuiabá. Às 16h45min a aeronave penetrou em uma área de formações meteorológicas significativas, com chuva forte e alta nebulosidade. Nestas condições, o piloto declarou uma mensagem de emergência via fonia ao controle de tráfego aéreo de Cuiabá e após este contato, não houve mais comunicação entre o controlador e o piloto.

O CENIPA (2014) esclarece que apesar da aeronave ter toda a documentação e revisões regulares, o piloto não estava apto ao voo, pois seu Certificado Médico Aeronáutico (CMA) e sua habilitação de voo por instrumentos (IFR) estavam vencidos, porém, o co-piloto estava com as habilitações e CMA em dias. Outra constatação é que o avião possuía o radar meteorológico Bendix/King, modelo RS-811<sup>a</sup>. A princípio, o equipamento possibilitaria aos pilotos captarem as condições meteorológicas presentes na rota até 240 milhas náuticas à frente. Na última revisão da aeronave, o radar não apresentou nenhuma discrepância ou qualquer indício de mau funcionamento que limitasse o seu uso, o que permitiria desvios necessários, já que havia combustível suficiente.

Como o local de decolagem era desprovido de sala de informação aeronáutica, ou Sala AIS, os pilotos teriam que acessar as condições meteorológicas pela internet, por telefone ou rádio. Das 14h30min às 17h45min, as imagens de satélites apresentavam nuvens Cumulonimbus nas proximidades do município de Chapada dos Guimarães, na região onde ocorreu o acidente e também na Área de Controle Terminal de Cuiabá. Os pilotos que voavam na região no mesmo horário do acidente relataram a presença de chuva forte (CENIPA, 2014).

De acordo com o CENIPA (2014), há a possibilidade de ter ocorrido uma redução da consciência situacional dos pilotos, ou seja, a falta de percepção do ambiente em que eles estavam inseridos, em função das condições meteorológicas presentes. O relatório ainda ressalta que as formações severas podem ser ocultadas por nuvens de pequeno porte que funcionam como uma cortina no para-brisa, escondendo a nuvem CB milhas à frente da aeronave. A análise também levanta a hipótese de uma possível falha ou até mesmo da inoperância do radar meteorológico a bordo.

Na primeira tentativa de desviar da formação, a aeronave efetuou curva à esquerda para o setor Sul e no retorno para a rota a ser voada encontrou áreas pesadas de mau tempo. Levantamentos feitos apontam tentativas de

<sup>4</sup> Compreende todos os serviços aéreos não operados por companhias aéreas, empresas de voos charter ou pelos militares.

mudanças de proa<sup>5</sup> e também a instabilidade da velocidade ao penetrar na formação.

Na tentativa desta área de mau tempo, o piloto curvou e completou dois giros de 360 graus pela direita em 3 minutos e 44 segundos. Neste sentido, vale ressaltar que a razão de giro foi superior ao valor padrão de 3°/segundo e ultrapassou a limitação técnica do radar. Por isso, a investigação questionou o funcionamento do equipamento, entretanto, o seu grau de destruição, inviabilizou a execução de testes funcionais.

Os destroços recolhidos após o acidente indicaram que a aeronave sofreu grandes esforços em sua estrutura ocasionados pela severidade das condições dentro da nuvem CB, o que levou a falha estrutural ainda em voo e após a colisão com o solo.

### 6.1.2 Acidente com a aeronave PT-WUG

De acordo com o relatório final do CENIPA (2012), a aeronave havia decolado às 18h00min, Horário Brasileiro de Verão (HBV) de Uberaba, Minas Gerais, com destino a Londrina, Paraná. Por volta das 21h33min, o piloto mantinha 4.500 pés em voo nivelado, quando recebeu a autorização para aproximar-se da pista pela cabeceira 13 para pouso, que iria acontecer conforme o procedimento de aproximação por instrumentos RNAV (GPS).

Entre o período da execução do procedimento de pouso até a perda do contato com o órgão de controle, os pilotos foram avisados sobre a presença de nuvens Cumulonimbus nas proximidades do aeródromo e da tempestade a ela atribuída. Os controladores de voo da Área de Controle Terminal de Londrina foram informados pelo copiloto que havia turbulência pesada a 9 quilômetros da posição BOLO<sup>6</sup> da rota de navegação e após a comunicação entre eles foi cortada. A aeronave foi encontrada posteriormente a 14 quilômetros distante de Londrina em uma plantação de soja, no distrito de Warta (CENIPA, 2012).

No relatório final produzido pelo CENIPA (2012) constam algumas informações sobre a aeronave e a tripulação. A aeronave possuía o *Enhanced Ground Proximity Warning System* (EGPWS)<sup>7</sup> e o radar meteorológico. O piloto, qualificado, experiente e com habilitações atualizadas, era treinado tanto para aquele tipo de aeronave quanto para manobras evasivas em situações específicas de *windshear*. No entanto, o copiloto, pouco experiente, não estava apto para o voo, visto que sua habilitação de voo por instrumentos estava vencida, além de não ter o treinamento específico do modelo deste avião.

O relatório final expressa que provavelmente o acidente ocorreu em função da aeronave penetrar em uma região com a presença de *windshear* e os pilotos não conseguiram realizar a manobra evasiva a tempo, mesmo com o alerta sonoro do EGPWS sobre a proximidade do solo. Apesar do

avião estar equipado com um radar meteorológico, este não possibilita detectar a *windshear*. Os pilotos reportaram aos controladores de tráfego aéreo que o radar fornecia informações sobre as formações próximas ao aeródromo, porém, estes dados não foram suficientes para evitar o acidente (CENIPA, 2012).

### 6.1.3 Reflexão dos acidentes com o radar meteorológico

Das informações contidas nos acidentes supracitados, entende-se que os pilotos devem, antes do voo, planejá-lo de forma minuciosa. Esta condição é reforçada pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100/12, de 2013, que obriga as tripulações a estudar, avaliar e verificar as condições meteorológicas envolvidas em todas as fases do voo com o intuito de aumentar a segurança das operações.

De acordo com os autores que defendem o uso do equipamento como ferramenta essencial de segurança, o radar meteorológico alerta os pilotos sobre as formações atmosféricas e os auxiliam nas tomadas de decisões. Uma retórica que pode até parecer repetitiva, mas que tem a função de reiterar um pensamento preventivo que jamais se esgotará, já que habilidades e competências são constantemente postas à prova no meio aeronáutico. Por isso, além de delinear os acidentes outrora descritos, é preciso associá-los à prática do piloto quanto ao uso do radar meteorológico.

O primeiro acidente, aponta como um dos fatores contribuintes são as condições meteorológicas adversas que, por algum motivo, não foram evitadas com a ajuda do equipamento a bordo. Neste sentido, há duas condições assinaladas na análise do sinistro relativas ao equipamento que carecem de reflexão, pois, o tornaram ineficiente. A primeira, compreende a curva demasiada que compromete a estabilização da antena e afeta a detecção das formações. A segunda, reforça o efeito de atenuação, quando nuvens cumuliformes estão oclusas por estratiformes, pois após realizar o desvio de uma primeira formação, na intenção de retornar para a rota, a aeronave penetrou em formações significativas.

O segundo acidente, também ocasionado por condições meteorológicas adversas aponta três reflexões pertinentes. A primeira, com o radar operante, as informações sobre as formações não foram suficientes porque os pilotos adentraram em região de turbulência severa, ficando evidente a importância do treinamento em simuladores para reconhecimento e recuperação de *windshear*, como o piloto em comando era qualificado. Em seguida, há a necessidade de aprimorar o radar embarcado nas aeronaves da aviação geral a fim de detectar os cisalhamentos de ventos associados a nuvens CB, como o caso da *microburst*. Por fim, são recomendados estudos que viabilizem instalar o radar meteorológico em solo nas localidades de maior incidência de cisalhamento de vento com o intuito de monitorar o deslocamento de nuvens de tempestade.

<sup>5</sup>Variações do eixo longitudinal da aeronave.

<sup>6</sup>Ponto plotado na rota do GPS através de coordenadas geográficas, onde a aeronave deve sobrevoar.

<sup>7</sup>É um sistema aperfeiçoado de alarme de proximidade com o solo.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a evolução do processo tecnológico na aviação, as cabines das aeronaves estão cada vez mais modernas, trazendo a princípio conforto, segurança e confiabilidade para a atividade aérea. Como elemento eficaz ao voo, o radar meteorológico de bordo também pertence a esse progresso. A tecnologia em constante transformação ainda se faz zelosa, seja na sua essência ou nos recursos humanos que a operacionaliza.

O ser humano, tacitamente dicotômico e relevantemente autêntico, representa um desafio aos avanços tecnológicos, uma vez que ao mesmo tempo em que projeta magníficos facilitadores do cotidiano, as máquinas, também é regulado pelas limitações epistemológicas a ele impostas. De fato, não basta apenas construir máquinas e equipamentos formidáveis, é preciso elevar, reforçar e concretizar a competência e habilidade em operá-las. Um assunto que é pertinente a vários segmentos do campo profissional, inclusive na aviação.

Por isso, apesar de toda a tecnologia embarcada nas modernas aeronaves, se a qualificação dos pilotos não atender às exigências operacionais para tornar a leitura e interpretação precisas, concisas e eficazes, o uso dos equipamentos tornam-se inseguros. Erros como o efeito atenuador ou sombra do radar meteorológico podem ocorrer e necessitam de senso crítico sobre as informações disponibilizadas para a adoção de medidas cabíveis que solucionem o problema.

A questão da preparação e do treinamento para pilotos é tão importante que requer recorrentes assimilações de conteúdos sobre o tema, sobretudo, quando se percebe que a deficiência e limitação veladas são representativas para um acidente aéreo. Válido ressaltar dois modelos de aviação civil, um refere-se à regular ou linhas aéreas, e o outro associado à aviação geral, foco dessa pesquisa. Quanto a aviação regular, seu processo de treinamento é sistematizado, repetitivo e padronizado, o que resulta em maiores índices de segurança. Destarte, constatou-se neste estudo que a aviação geral ainda representa um número expressivo nas estatísticas de acidentes principalmente quanto ao deficiente julgamento, daí as questões sobre fator humano terem tamanha relevância.

Como evidenciar a fragilidade implícita no treinamento - ou, em alguns casos, a falta dele - dos pilotos da aviação geral? Percebeu-se com o estudo que o segmento, por ser em parte desprovido de padronização, está mais suscetível a eventuais sinistros. Isto revela uma tocante preocupação já que os dados do CENIPA, oriundos do período entre 2005 e 2014, embasam essa afirmativa. Nota-se que esses pilotos carecem de treinamento eficaz quando os resultados apontam para um deficiente julgamento de pilotagem e supervisão gerencial. Por isso, a submissão deles ao ambiente de simulacro seria fundamental e elevaria sua cognição para reflexões situacionais posteriores.

A fundamentação teórica repercutiu na insistência de uma preparação coesa desses pilotos, até porque a mesma

máquina que evolui também requer mão-de-obra qualificada para a sua perfeita e harmônica operação. Além do ambiente de simulação, aqui reiterado, a necessidade do uso adequado dos equipamentos ficou evidente. Pretendeu-se enfatizar as operações do radar meteorológico e, claro, suas peculiaridades, a fim de contribuir com o permanente ensino-aprendizado dos aeronautas sobre tal assunto. Ainda se reforçou as limitações do equipamento no intuito de advertir os profissionais quanto aos problemas dele advindos.

A sedimentação desses problemas foi sustentada pelos acidentes aéreos causados por fenômenos meteorológicos aqui demonstrados. Neles, de forma efetiva a interpretação dos dados contidos no display foi decisiva e, portanto, pertinente ao argumento das limitações do homem e de sua máquina. Do homem, no sentido de exteriorizar sua evidente forma de sucumbir a falhas, da máquina, no viés de suas restrições operacionais e da necessidade dinâmica de sua sofisticação. Foi comprovada e verificada que a concomitante desarmonia entre esses elementos culminou nos acidentes descritos. Mas vai-se além, servem de exemplos para que eventos futuros, motivados pela prevenção, sejam inibidos.

Os estudos apresentados e a análise de dados permite inferir que a aviação geral ainda é carente de treinamentos específicos relativos ao uso do radar meteorológico de bordo. De fato, percebe-se o quanto esse equipamento é essencial e de extrema importância na capacitação dos pilotos, e, que além de ser um instrumento vital e primordial para a segurança de voo, quando facultada aos pilotos evitarem incursões indevidas nas condições meteorológicas adversas que colocam em risco a aeronave, seus passageiros e tripulantes.

Pelo caráter mutante da tecnologia e a constante interferência do ser humano em seus ambientes profissionais e organizacionais, este assunto não se esgota, pelo contrário, viabiliza mais pesquisas voltadas para a prevenção que explorem acidentes aéreos ocasionados pela ineficiente interpretação do radar meteorológico por parte dos pilotos. Também é possível estudar a viabilidade de aprimorar o radar meteorológico desta aviação estudada para detectar turbulências a baixa altura.

## REFERÊNCIAS

- AIRBUS. Flight Operations Briefing Notes: Adverse Weather Operations. Optimum Use of the Weather Radar. 2007. Disponível em: <[http://www.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/safety\\_library\\_items/AirbusSafetyLib\\_-FLT\\_OPS-ADV\\_WX-SEQ07.pdf](http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/safety_library_items/AirbusSafetyLib_-FLT_OPS-ADV_WX-SEQ07.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2016.
- BENDIX. Pilot Guide RDS 81/82: Digital Weather Radar. 1996. Disponível em: <[https://www.bendixking.com/HWL/media/Pilot-Guides/006-08539-0003\\_4.pdf](https://www.bendixking.com/HWL/media/Pilot-Guides/006-08539-0003_4.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2016.
- CENIPA. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Panorama Estatístico da Aviação Civil Brasileira. 2015. Disponível em: <<http://www.cenipa.aer.mil.br/>>

- cenipa/Anexos/article/19/Ocorr%C3%A4ncias%20Aeron%C3%A1uticas%20Avia%C3%A7%C3%A3o%20Civil%202005%20a%202014.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2016.
- \_\_\_\_\_. Relatório Final: A – N° 52/cenipa/2014. 2014. Disponível em: <<http://www.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios-finais>>. Acesso em: 14 abr. 2016.
- \_\_\_\_\_. Relatório Final: A - N° 071/CENIPA/2012. 2012. Disponível em: <<http://www.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/relatorios-finais>>. Acesso em: 20 abr. 2016.
- EISMIN, Thomas K. Aircraft: Electricity & Electronics. 5 ed. New York: GLENCOE, 2001.
- FERREIRA, Jordana Silva. Utilização de Radares na Identificação de Fenômenos Meteorológicos. Goiânia: PUC-GO, 2010.
- HONEYWELL. ART 2000 ART 2100: Digital Weather Radars. 2001. Disponível em: <<http://www.completeavionics.com/assets/art2000-art2100.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2016.
- IAC. Instituto de Aviação Civil. Mecânico de Manutenção Aeronáutica: Aviônicos II. 1 ed. Rio de Janeiro: Ministério da Aeronáutica, 2003.
- JOHNSTON, Joe. Avionics for the Pilots: An introduction to navigational and radio systems for aircraft. Ramsbury: Airlife, 2007.
- KAYTON, Myron; FRIED, Walter R. Avionics Navigation Systems. 2 ed. New York: Wiley, 1997.
- MANSEN, David. Airborne Weather Radar. Avionics & Instruments. Avionics News. 2010. Disponível em: <[http://home.earthlink.net/~dick156/AEA\\_RadarTrainingClass\\_Course\\_Rev-06B\\_Final\\_AEA.pdf](http://home.earthlink.net/~dick156/AEA_RadarTrainingClass_Course_Rev-06B_Final_AEA.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- \_\_\_\_\_. Airborne Weather Radar: Theory & Operation for More Effective Troubleshooting. 2011. Disponível em: <[http://www.aea.net/avionicsnews/anarchives/mar11\\_airborneradar.pdf](http://www.aea.net/avionicsnews/anarchives/mar11_airborneradar.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- MIGUENS, Altineu Pires. Navegação: A Ciência e a Arte. V. 1. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2000.
- MORALES, Carlos Augusto. Meteorologia com Radar. 2013. Disponível em: <[http://www.dca.iag.usp.br/www/material/morales/ACA412/Aula\\_Radar\\_01-Introducao\\_2013.pdf](http://www.dca.iag.usp.br/www/material/morales/ACA412/Aula_Radar_01-Introducao_2013.pdf)>. Acesso em: 11 mar. 2016.
- MOSCATI, Ney Ricardo. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia: Acidentes Aéreos Associados à Condições Meteorológicas Adversas e Melhoria Contínua dos Sistemas das Aeronaves. 2005. Disponível em: <[http://www.sbmet.org.br/portal/publisher/uploads/publicacoes/8\\_2005\\_Volume\\_29\\_No\\_3.pdf](http://www.sbmet.org.br/portal/publisher/uploads/publicacoes/8_2005_Volume_29_No_3.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- PAMPLONA, Daniel Alberto; FORTES, João Luis de Castro; ALVES, Claudio Jorge Pinto. Quantificação dos Impactos Operacionais na Aviação na Presença de Formações Meteorológicas. XXIX CONGRESSO DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, Ouro Preto, p. 2046-2057, nov. 2015.
- RODEGUERO, Miguel Angelo; BRANCO, Humberto. Gerenciando o Risco na Aviação Geral: Segurança de Voo. 1 ed. São Paulo: Editora Bianchi, 2013.
- SANCHEZ-ROCHA, Jose. et al. Enciclopedia de Aviación y Astronáutica. Vol. 7. Barcelona: Editora Garrida, 1972.
- SANFUENTES, Jorge Parker. Historia Del Radar. Revista de Marina-Armada de Chile, Santiago, p. 1-7, 2000.
- SANTOS, Gustavo Mascarenhas. A Evolução e Utilização do Radar Meteorológico de Bordo. Goiânia: PUC-GO, 2013.
- SONNEMAKER, João Baptista. Meteorologia: PP – PC – IFR – PLA. 31 ed. São Paulo: ASA – Edições e Artes Gráficas Ltda, 2012.
- SOUZA, Walkir Barros. Meteorologia Aeronáutica: Piloto Privado. 3 ed. Brasília: HBL gráfica, 2011.
- WERTH, John. Airborne Weather Radar Limitations. The Front. 2014. Disponível em: <<http://www.nws.noaa.gov/os/aviation/front/14dec-front.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2016.
- WHINTON, Roger C. et al. History of Operational Use of Weather Radar by U.S. Weather Services. Part I: The PRE-NEXRAD Era. Weather and Forecasting, 19 de Fev de 1998. Vol. 13, N. 2, p. 219–243.