



universidade
de aveiro

Radares Meteorológicos

Aviónica e Espaciónica

2024/2025

Alexandre Silva-107957

Magner Gusse-110180

Rúben Abreu- 107421

Resumo

Este trabalho visa estudar os radares meteorológicos, seu funcionamento e importância. O desenvolvimento de Radares meteorológicos remonta a Segunda Guerra Mundial quando os operadores de radares militares notaram ecos estranhos que apareciam na exibição, e o seu papel têm sido desde então cada vez mais fundamental na prevenção e proteção em casos de eventos meteorológicos. Os radares meteorológicos emitem ondas eletromagnéticas que são refletidas pelas partículas de água da chuva, neve ou granizo, o que permite a análise da onda refletida de forma a melhor prever estes fenômenos e prevenir desastres.

Além dos tipos convencionais, destacam-se radares como o Doppler, radares de polarização dupla e radares móveis ou de bordo, que oferecem flexibilidade e aplicação específica em aeronaves. O trabalho aborda também suas aplicações na aviação, onde auxiliam no desvio de condições climáticas adversas, garantindo a segurança dos voos.

A evolução tecnológica e a integração dos radares com outros sistemas, como satélites, reforçam sua relevância na meteorologia moderna e na mitigação de riscos climáticos globais.

Índice

Resumo	1
Introdução	2
Princípios de funcionamento dos Radares Meteorológicos	2
Tipos de Radares	4
1. Radares Convencionais:	4
2. Radar Doppler:	4
3. Radar de polarização Dupla	5
4. Radares móveis	6
5. Radares de Bordo	6
Aplicações na Indústria Aeronáutica	7
Conclusão	11
Bibliografia	12

Introdução

Este trabalho, no âmbito da cadeira Aviónica e Espaciónica, tem como objetivo estudar os radares meteorológicos, nomeadamente o seu funcionamento e sua importância da prevenção de fenómenos naturais.

A história dos radares meteorológicos começa durante a Segunda Guerra Mundial, quando os operadores de radares militares notaram ecos estranhos aparecendo na exibição. Estes ecos ocorriam devido às condições atmosféricas, e eram capazes de esconder a posição de potenciais alvos inimigos. Após a guerra, os cientistas militares continuaram a estudar esse fenómeno e desenvolveram um uso para esses ecos, o radar meteorológico.

Os radares meteorológicos, tal como a maioria dos radares convencionais, emitem ondas eletromagnéticas que são capazes de alcançar grandes distâncias. Estas ondas ao atingir algum objeto, tal como chuva, neve ou granizo, parte da energia é refletida de volta para o recetor do radar. A quantidade de energia refletida depende da dimensão dos objetos.

Estes aparelhos podem ser instalados em vários locais e estruturas, e são importantes na monitorização de eventos climáticos, prevenindo muitas vezes catástrofes. Também são amplamente usados na área de investigação e na segurança aeronáutica. Além disso existem alvos não meteorológicos, mas com interesse para a previsão do estado do tempo, como as poeiras e insetos [1].

Princípios de funcionamento dos Radares Meteorológicos

O princípio de funcionamento do radar meteorológico pode ser comparado com o sistema de navegação de um morcego. O morcego emite sons de alta frequência que ao serem intercetados por obstáculos retornam ao seu ouvido. Quanto mais rápido o som retornar, mais perto estará o obstáculo. No entanto, no caso do radar meteorológico, este emite ondas eletromagnéticas. Como já foi referido, na presença de hidrometeoros ocorre um fenómeno chamado dispersão de Rayleigh, provocando a reflexão de parte da energia. A dispersão de Rayleigh ocorre quando os comprimentos de onda são maiores do que os diâmetros das partículas de hidrometeoro. Diferentes comprimentos de onda identificam partículas de diferentes tamanhos, e como é de esperar quanto maior for o comprimento de onda maior será o tamanho das partículas que o radar consegue detetar [2].

O radar meteorológico funciona em três bandas de frequências distintas. O radar de banda S compreendem um comprimento de onda mais longo, entre 8 e 15 cm, e é muito utilizada nas regiões tropicais, tendo a vantagem de detetar gotas de grande dimensão e de os respetivos comprimentos de onda não serem facilmente atenuados pela precipitação. Além disso conseguem detetar chuvas até 300 km. O

radar de banda C compreende comprimento de onda entre 4 e 8 cm, apresentando uma boa relação entre o custo e a capacidade de detecção. No entanto, o sinal desta gama de comprimento de onda é mais atenuado pela precipitação do que a banda S. O radar de banda X compreende comprimentos de onda entre 2.5 e 4 cm, e é utilizada, principalmente, para a detecção de partículas de menor dimensão, como gotículas de precipitação. Deste modo, é muito utilizada para estudos sobre a formação e desenvolvimento de nuvens e detecção de neve, que se encontram a uma distância reduzida, visto que o sinal desta gama de comprimentos de onda é muito atenuado [3].

Os radares meteorológicos são compostos por cinco componentes. Esses componentes são o transmissor, antena, processador do radar, recetor e sistema de exibição. O transmissor gera os pulsos eletromagnéticos e a antena envia esses pulsos para a atmosfera e recebe os pulsos refletidos. O radar não mede diretamente a presença dos hidrometeoros. Como tal, o radar recebe um determinado nível de retorno dos alvos conhecido como refletividade. Deste modo, o processador do radar analisa os dados recebidos, e o recetor identifica o sinal e amplifica os sinais mais fracos recebidos. Finalmente, o sistema de exibição mostra os dados do radar para seus espetadores. As cores apresentadas no *display* variam conforme o aumento da refletividade do eco em decibéis (dBZ) nas formações atmosféricas. Na Tabela 1 [4] está representada uma interpretação comum que é realizada tendo em conta a cor no radar.

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; Possibilidade de granizo	Vermelho escuro
6	>57	Muito intensa e granizo; Possibilidade de grande Intensidade de granizo	Magenta

Tabela 1- Intensidade de precipitação

O radar consegue medir a distância a que se encontra o hidrometeoro. Para tal, o radar regista tempo total que o pulso leva para ir até o alvo e voltar. Tendo em conta, que a velocidade da onda emitida é conhecida, o radar consegue determinar

a distância. A distância real até a partícula é metade do caminho total, pois o pulso percorre ida e volta.

Para além da distância, o radar é capaz de medir a velocidade da partícula, em relação ao radar, utilizando o efeito Doppler, que é o deslocamento da frequência das ondas refletidas devido ao movimento da partícula. Isto é, se a partícula se está a aproximar do radar, a frequência do sinal refletido aumenta, e se a partícula se está a afastar, a frequência do sinal refletido diminui. Esta variação na frequência é analisada para determinar a velocidade da partícula em direção ao radar ou para longe dele.

De forma a melhorar a precisão dos radares meteorológicos e a obter melhores previsões meteorológicas, as estimativas de chuvas do radar também podem ser combinadas com as estimativas dos satélites meteorológicos.

Tipos de Radares

Existem diferentes tipos de radares, os mesmos funcionando de diferentes formas consoante a aplicação específica a qual está destinado, no entanto existem alguns que se destacam:

1. Radares Convencionais:

Estes consistem na emissão de pulsos de ondas eletromagnéticas numa polarização e a medida do tempo que demora onda refletida a chegar ao seu recetor. A partir do sinal recebido conseguem medir a intensidade do retorno e determinar assim a quantidade de precipitação.

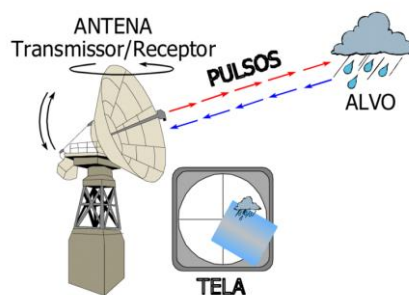


Figura 1 Esquema de funcionamento de radares convencionais [5].

2. Radar Doppler:

Estes sistemas baseiam-se no efeito Doppler e além de medirem a intensidade, medem também a fase e a frequência da onda refletida, por estar o alvo em movimento em relação ao radar (gotas de chuva, flocos de neve, nuvens), podendo assim analisar a diferença de fase e frequência dos sinais [6]. Sabendo que pelo efeito de doppler, a frequência da onda refletida aumenta com a aproximação do alvo em relação a um observador estacionário e diminui com o afastamento do alvo, assim sendo, pode-se

saber a direção do vento, chuva, neve e granizo. Isto permite detetar ventos fortes, tempestades, ciclones tropicais.

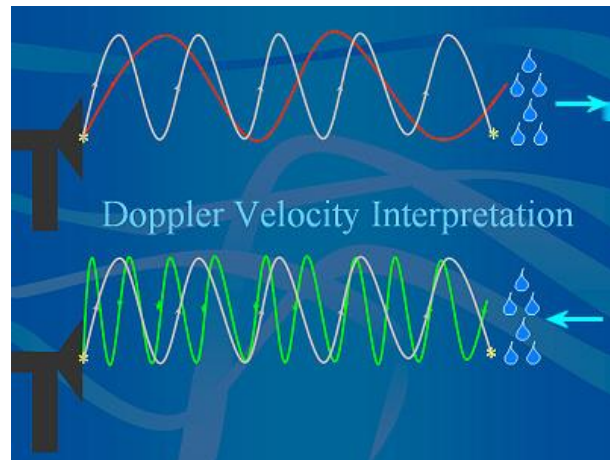


Figura 2 Esquema do radar Doppler [7]

3. Radar de polarização Dupla

Estes radares ao contrário dos convencionais, emitem pulsos com polarização não só horizontal, mas também vertical e depois compara as propriedades associadas a cada polarização para obter informação mais detalhada sobre o alvo, a partir de parâmetros como[6]:

- Diferença de Fase Diferencial;
- Razão de refletividade diferencial;
- Coeficiente de correlação;
- Razão de despolarização linear.

Este método permite melhoria na qualidade dos dados de radar, sendo possível diferenciar chuva, granizo, neve e até partículas não meteorológicas, como insetos ou poeira[8], reduzindo erros causados por tamanho das gotas e filtrando ruído associados a pássaros ou interferência.

Este tipo de radares pode ser usado aplicando os mesmos princípios dos radares doppler, aproveitando-se assim dos benefícios e potencialidades de ambos tipos.

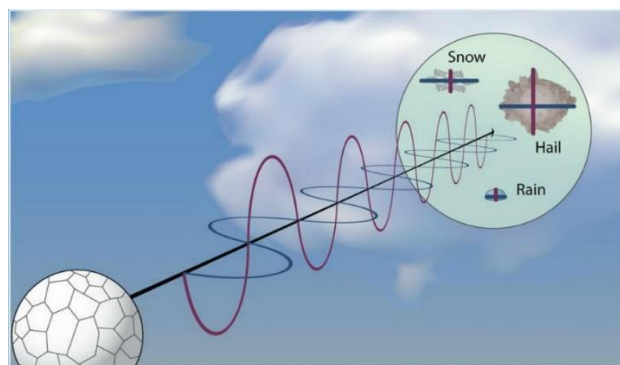


Figura 3 Esquema de funcionamento de radares de polarização Dupla [9]

4. Radares móveis

Estes radares são montados em veículos ou estruturas móveis, de forma a analisar de forma rápida e localizada, fenómenos meteorológicos como desenvolvimento de tempestades a baixas altitudes e podem ser ainda usados para monitorar furacões, tornados e tempestades [10]. Neste caso, são usados radares com o princípio de funcionamento dos radares doppler e de dupla polarização [11].



Figura 4 Radar Móvel num camião [10]

5. Radares de Bordo

Estes radares são montados em aeronaves e fornecem dados em tempo real sobre as condições meteorológicas na direção pretendida, são usados na aviação de forma a melhor evitar condições extremas na navegação, como também para pesquisas e previsões meteorológicas em áreas remotas ou inacessíveis e em regiões de maior interesse como furacões [12].

No entanto, o seu uso mais comum é na navegação de aeronaves comerciais, de forma a evitar a passagem por locais onde há condições adversas, que podem causar danos aos passageiros e a aeronave. Assim sendo, estes radares são tipicamente instalados no nariz da aeronave, e a sua visualização depende como os radares terrestres, da reflexividade do alvo. Alguns dos fenómenos que mais afetam a segurança das aeronaves são a turbulência, mudanças de direção do vento, chuvas fortes, granizo e formação de gelo [13].



Figura 5 Radar Meteorológico de uma Aeronave

O estudo destes fenómenos, associado à reflexividade dos mesmos permite que algumas aeronaves disponham de radares com modo de visualização de turbulência, sendo que esta função obedece o funcionamento dos radares doppler e depende do movimento das partículas para seu funcionamento efetivo. A equipa de bordo, usa determinadas técnicas para melhor fazer uso dos radares a bordo, nomeadamente [14]:

- Ajuste do ângulo de direção do radar;
- Ajuste da sensibilidade do radar;
- Modos do radar (Normal e Turbulência).

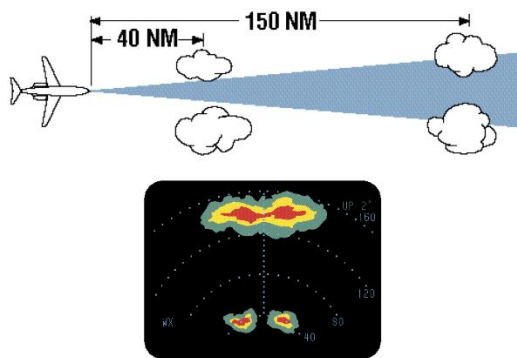


Figura 6 Esquema de funcionamento de radares de aeronaves [15]

Aplicações na Indústria Aeronáutica

Durante um voo, uma aeronave pode estar sujeita a várias condições meteorológicas desfavoráveis, desde a turbulência, trovoadas, formação de gelo, baixa visibilidade e até chuvas fortes ou granizo [16].

Então é necessário que um avião tenha maneiras de se desviar destes acontecimentos meteorológicos, para não sofrer danos estruturais. E são os radares meteorológicos que ajudam os aviões a realizar essa manobra.

Embora seja comum pensar que todas as aeronaves estão equipadas com radares meteorológicos a bordo, nem sempre é o caso. Normalmente aviões comerciais recebem os dados sobre o tempo através de sistemas externos como, sistemas meteorológicos colocados em satélites ou até baseados na Terra, ou então informação meteorológica fornecida pelas torres de controlo aéreo [17].

No entanto, algumas aeronaves podem ter sistemas de radar meteorológico pequenos instalados, mas são geralmente separados da eletrónica principal da aeronave. Os sistemas são projetados para serem compactos e energeticamente eficientes para uso em aviões.

Para os pilotos terem a noção e para que os perigos sejam visíveis para quem está ao comando do avião, as aeronaves modernas utilizam *Electronic Flight Bags* (EFB), que são computadores tablet com software especializado que mostra os dados meteorológicos para os pilotos. Além disso, auxilia as tripulações a

realizarem tarefas de gestão de voo de forma mais simples e eficiente, por exemplo, substitui manuais de operação e permite automatizar funções como cálculos de desempenho da decolagem.



Figura 7- EFB

Basicamente, para usar corretamente o radar meteorológico é necessário, inicialmente conhecer as especificações do radar, obter informação para as previsões meteorológicas e atualizar ao longo do voo, ajustar a inclinação da antena como o modo padrão para detecção e avaliação inicial do clima, ir alterando o ganho do sistema para obter uma percepção melhor do que os radares podem estar a observar e, por fim, estar atento aos sinais visuais e orais emitidos pelo sistema na avaliação de ameaças e perigos meteorológicos [18], [19].

A gestão correta da **inclinação da antena** e da **seleção do alcance** no radar meteorológico são fundamentais para obter uma exibição precisa no monitor. Por vezes, a tripulação deve ajustar periodicamente a inclinação para um **scan** do clima à frente, utilizando o modo automático para detecção inicial e o controlo manual para uma análise mais detalhada [20].

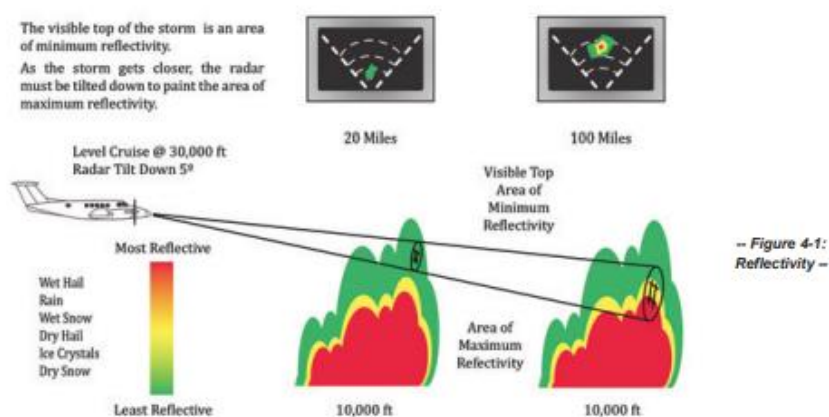


Figura 8- Exemplo do uso da inclinação da antena e da variação do alcance para melhor percepção do clima pela frente

A sensibilidade do recetor de radar varia conforme o sistema, sendo a posição CAL (AUTO) a mais adequada para detetar nuvens convectivas padrão. Em altitudes baixas, reduzir o ganho pode ser útil para uma análise correta do clima,

devido ao aumento da reflexividade das células convectivas em ambientes mais húmidos. Em altitudes mais altas, com partículas de água congeladas, o ganho deverá ser aumentado para avaliar ameaças. A turbulência é difícil de prever, mas sinais como relâmpagos fortes indicam turbulência severa [21].

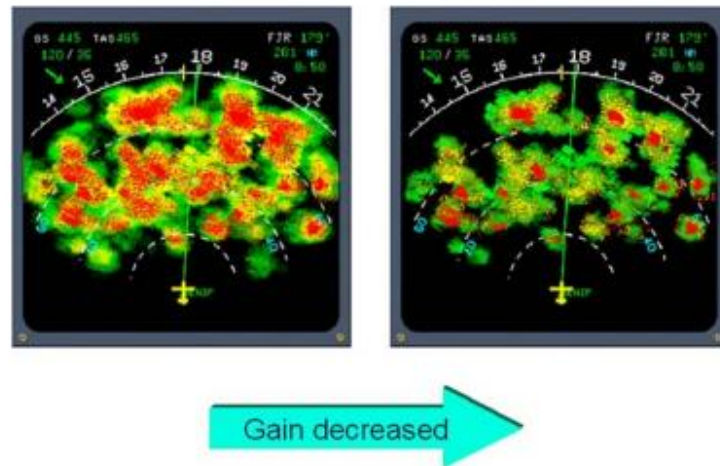


Figura 9-Efeito da redução do ganho

Alguns exemplos de radares utilizados na indústria, em voos transatlânticos, as aeronaves dependem de sistemas como o Cloud Top Height (CTH), que utiliza dados de satélites para fornecer informações sobre tempestades e condições meteorológicas adversas em áreas remotas. Esses sistemas complementam os radares convencionais, quando presentes, e ajudam os pilotos a evitar regiões perigosas, garantindo maior segurança e eficiência operacional durante o voo [22].

Outro exemplo é Sistema TDWR (Terminal Doppler Weather Radar): operado pela Administração Federal de Aviação (FAA), o sistema é usado principalmente para detetar condições perigosas de precipitação e ventos sobre e próximos a grandes aeroportos dos EUA com atividade frequente de tempestades. Até 2014, existiam 45 sistemas operacionais TDWR-Supplemental Project Generator (SPG) localizados em áreas metropolitanas importantes nos Estados Unidos e em Porto Rico.[23]

Apresentando agora um caso prático de como um piloto utilizava um radar meteorológico e de como manobrava o avião perante as várias adversidades que se podiam apresentar, tendo em conta as várias rotas que pode escolher, o gasto de combustível e a possível danificação na aeronave. A figura abaixo apresenta isso.

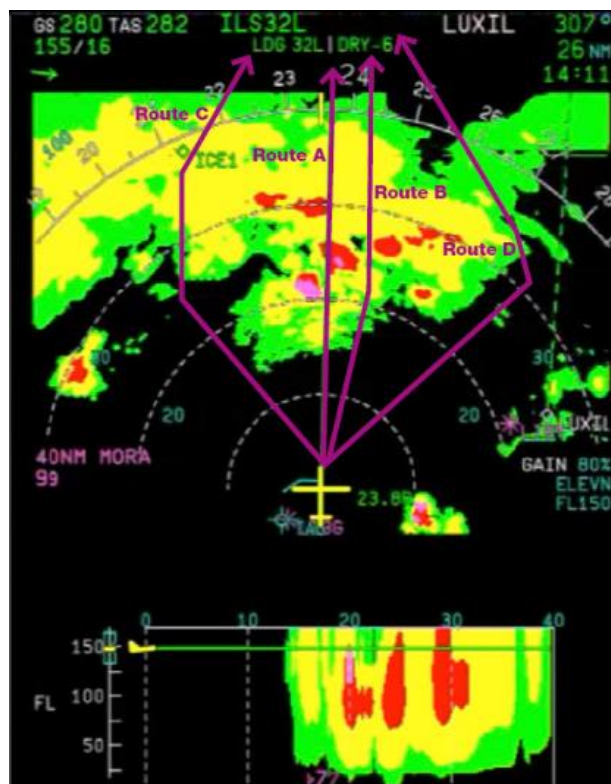


Figura 10- Imagem recebida pelos radares e possíveis rotas que o avião pode realizar para passar as adversidades

A rota A é impensável, o avião estaria a entrar em zonas vermelhas correspondentes a zonas de tempestade. A rota B parece apetecível, no entanto o avião ir-se-ia encontrar perto das zonas severas, então a antena devia ser ajustada para baixo para analisar melhor o clima. A rota C parece ser uma possível rota para escapar, pois contorna a maioria das tempestades com uma ampla margem de segurança. No entanto desvia-se muito da rota inicialmente predefinida aumentando o gasto de combustível e de possíveis atrasos. A rota D apesar de se desviar também um pouco da rota inicialmente predefinida é a que permite melhor mitigar os riscos. [17]

Sendo assim, quando confrontado com uma situação em que o clima à frente revela um sistema de tempestades extenso, existem sempre várias opções possíveis. Antes de a tripulação tomar uma decisão, é prudente analisar cuidadosamente o clima, verificando a expansão vertical das diversas células e, se possível, considerar o desvio para uma rota alternativa.

Apesar da qualidade dos sistemas de radar meteorológicos modernos, os fabricantes estão sempre à procura de melhorá-los para fazer os voos mais seguros. Um dos problemas que existe é dos cristais de gelo, apesar de esses cristais não criarem formação de gelo nas superfícies das asas, estes podem criar problemas nas pás do ventilador e até falhas completas do motor. Sendo assim, os fabricantes estão a tentar melhorar os sistemas de radar meteorológico para que zonas com cristais de gelo em altitudes elevadas sejam detetadas e mostradas para os pilotos. [24],[25].

Conclusão

Os radares meteorológicos são ferramentas essenciais na previsão do tempo, proteção contra desastres naturais e segurança em diversas áreas, particularmente na aviação. Este trabalho explorou os princípios de funcionamento, os diferentes tipos de radares e as suas aplicações, destacando a importância destas tecnologias na meteorologia moderna e na gestão de riscos climáticos.

Os radares meteorológicos operam emitindo ondas eletromagnéticas que, ao encontrarem partículas atmosféricas como chuva, neve ou granizo, refletem parte da energia de volta ao sistema. Esta reflexão permite detetar e analisar fenómenos meteorológicos, seja pela intensidade do sinal refletido ou pela variação de frequência, utilizando o efeito Doppler. Adicionalmente, os avanços tecnológicos possibilitaram a criação de radares mais sofisticados, como os de polarização dupla, que oferecem maior precisão e reduzem erros associados a interferências externas.

Na indústria aeronáutica, os radares meteorológicos desempenham um papel crítico. Eles permitem aos pilotos antecipar e evitar condições climáticas adversas, como turbulências, granizo ou formações de gelo, que podem comprometer a segurança e o desempenho das aeronaves. Com ferramentas como os Eletronic Flight Bags (EFBs) e sistemas complementares baseados em satélites, os pilotos conseguem integrar dados meteorológicos em tempo real para tomar decisões mais seguras. Além disso, a gestão adequada de parâmetros, como a inclinação da antena e o ganho do radar, contribui para uma monitorização mais precisa das condições à frente.

Adicionalmente, foi apresentado um caso prático no âmbito deste trabalho, ilustrando como os pilotos utilizam radares meteorológicos para avaliar condições meteorológicas adversas durante o voo. O exemplo destacou a análise de diferentes rotas para evitar tempestades, considerando não apenas a segurança da aeronave e dos passageiros, mas também fatores operacionais, como o consumo de combustível e possíveis atrasos. Este caso prático demonstrou na prática a relevância dos radares na tomada de decisões informadas e na mitigação de riscos.

Por fim, conclui-se que os radares meteorológicos continuam a ser uma ferramenta indispensável, tanto na previsão e prevenção de desastres naturais, como no apoio a operações críticas, como a aviação. A constante evolução destas tecnologias será essencial para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas, garantindo maior segurança, eficiência e resiliência na gestão de riscos climáticos globais.

Bibliografia

- [1] “O que é Radar Meteorológico.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.saisp.br/site/oque.htm>
- [2] Stacy Stewart, “Weather Radar Principles,” *RA-IV WMO Tropical Meteorology Course*, Mar. 2016.
- [3] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera.” Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=radar01.xml>
- [4] M. V. da Costa and T. A. da Silva, “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, Dec. 2016, Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/view/386>
- [5] E. Galvani, “Eventos pluviais extremos: análise comparativa entre observações de RADAR e pluviômetros de superfície.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228997680>
- [6] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=radar04.xml>
- [7] “Using and Understanding Doppler Radar.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/mkx/using-radar>
- [8] M. Kumjian, “Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications,” *J Operat Meteorol*, vol. 1, no. 20, pp. 243–264, Nov. 2013, doi: 10.15191/nwajom.2013.0120.
- [9] “Dual-polarization radar: Stepping stones to building a Weather-Ready Nation.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.weather.gov/news/130425-dualpol>
- [10] “Mobile Radar”, Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.nssl.noaa.gov/tools/radar/mobile/>
- [11] R. Neely *et al.*, “The NCAS mobile dual-polarisation Doppler X-band weather radar (NXPol),” *Atmos Meas Tech*, vol. 11, no. 12, pp. 6481–6494, Dec. 2018, doi: 10.5194/AMT-11-6481-2018.
- [12] “Gulfstream IV-SP | Office of Marine and Aviation Operations.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.oma.noaa.gov/aircraft-operations/aircraft/gulfstream-iv-sp>
- [13] F. J. Yanovsky, “Evolution and Prospects of Airborne Weather Radar Functionality and Technology.”
- [14] “Optimum use of weather radar | Safety First.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <https://safetyfirst.airbus.com/optimum-use-of-weather-radar/>
- [15] “How to use a weather radar like a pro - PilotEdge Forums.” Accessed: Nov. 20, 2024. [Online]. Available: <http://forums.pilotedge.net/viewtopic.php?t=9136>
- [16] “Aviation Weather Data: Accuracy and Impacts | Climavision.” Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://climavision.com/blog/aviation-weather-data-accuracy-and-impacts/>
- [17] “Optimum use of weather radar | Safety First.” Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://safetyfirst.airbus.com/optimum-use-of-weather-radar/>
- [18] “How to use a weather radar like a pro - PilotEdge Forums.” Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <http://forums.pilotedge.net/viewtopic.php?t=9136>

- [19] "Weather Radar Techniques | Jetcareers." Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://jetcareers.com/forums/threads/weather-radar-techniques.35839/>
- [20] D A V I D W . M A N S E N, "Airborne Weather Radar." Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: https://aea.net/AvionicsNews/ANArchives/May11_AirborneRadar.pdf
- [21] "Flight Operations Briefing Notes," Adverse Weather Operations, Optimum Use of the Weather Radar. Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/163.pdf>
- [22] "Weather Technology in the Cockpit | Research Applications Laboratory." Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://ral.ucar.edu/projects/weather-technology-in-the-cockpit>
- [23] "Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) | National Centers for Environmental Information (NCEI)." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/products/radar/terminal-doppler-weather-radar>
- [24] "What is 'aircraft weather radar' and how do pilots use it avoid turbulence? - The Points Guy." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://thepointsguy.com/airline/aircraft-weather-radar-doppler/>
- [25] "Flight Campaign Studies Radar Detection of Ice Crystal Icing - NASA." Accessed: Nov. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/image-article/flight-campaign-studies-radar-detection-of-ice-crystal-icing-2/>