OBTENÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MODELAGEM DE ANEMOGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON

Antônio Carlos Hanig
John Heberty de Freitas
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira*
João Paulo Silva Lima
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Curso de Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: *michelle.galvao@ufg.br

PAPER ID: SIT2327

ABSTRACT

This paper seeks to present a methodology that can contribute to the effectiveness of the operation of new airport projects, focusing on the analysis and studies of winds on the runway and airport takeoff. A methodological proposal is presented, which consists of collecting wind data in existing airports, which historically have a high crosswind index, in order to present non-conformities in the standard models applied and/ or estimated a priori. To validate the study, three Brazilian airports are evaluated: Guarulhos International Airport - São Paulo/SP, Guararapes International Airport - Recife/PE and Barreiras/Bahia Regional Airport. Through the modeling of Anemogram using the Python language, it is possible to analyze the orientation of runway landing and takeoff. We used the analysis of four probability distribution curves for the winds at the proposed sites, the distribution GEV - Generalized Extreme Value Distribution, Log-normal, Weibull and Gumbel, to identify which or which would be the best choice of probability distribution that can more assertively describe the behavior of the winds in that place, and serve to assist in predicting future undesirable events in landing and takeoff operations, Seeking to improve operational and safety in air transport. The results show that the Weibull distribution is the one that best fits the wind data at Guarulhos Airport. The Lognormal distribution is the most suitable for wind data at Recife Airport; and the Gumbel distribution is the one that best fits the wind data at Barreiras Airport. These results are important because they allow more accurate wind forecasts to be made at each airport, which can help improve the operability and safety of aeronautical operations. In addition, choosing the correct probability distribution can help prevent future undesirable events such as aviation accidents and incidents. However, it is important to emphasize that the choice of the correct probability distribution depends on the particularities of each location and the data collected. Therefore, it is necessary to perform a careful analysis of wind data at each airport before choosing the most appropriate probability distribution.

Keywords: Airport, Wind, Anemogram, Runway Orientation, Python.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor e a terceira autora agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq por meio do processo no 168071/2022-3 na modalidade Iniciação Tecnológica – ITC-A para o desenvolvimento deste trabalho, referente ao projeto de desenvolvimento tecnológico "PI06353-2022 – *Desenvolvimento de modelo de acidente em operações de pouso e decolagem de aeronaves comerciais*" da Universidade Federal de Goiás - UFG-FCT.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais definições de aeroporto é: “um aeroporto é um complexo sistema de facilidades, e geralmente o empreendimento mais importante da região. É um gerador econômico e catalisador de captação de investimentos em sua área de atuação” (KAZDA; CAVES, 2007). No entanto, essa definição só faz sentido com uma pista bem dimensionada e adequada à aeronave de projeto (PAMPLONA; ALVES, 2013).

Os efeitos adversos do vento cruzado são minimizados com o pouso e a decolagem sempre na direção contrária do vento. Assim a orientação da pista depende da componente de velocidade do vento, da frequência e da direção (ASHFORD et al. 2011). Uma das principais motivações deste estudo rege em torno da segurança das operações de pouso e decolagem de voos em aeródromos.

O estudo dos ventos para a aviação é essencial, pois garante a segurança das operações de pouso e decolagens, que são operações que correspondem por cerca de 40% dos índices de acidentes aeronáuticos. Logo, estudar a posição e a velocidade dos ventos no sítio aeroportuário faz-se imprescindível, além da recomendação de operacionalidade de 95% que um aeroporto deve atingir em um ano. Isto, bem definido, torna o aeroporto operacional e comercialmente atrativo.

Diante dessa problemática, este artigo visa apresentar uma proposta metodológica que garanta a eficácia da operacionalidade de novos projetos aeroportuários. Assim, como objetivo geral, este trabalho almeja obter a orientação de pista de pouso e decolagem de aeroportos brasileiros, de forma com maior precisão, de forma que seja possível avaliar as condições de segurança operacionais de pouso e decolagem dos aeródromos existentes. Para tanto, serão selecionados três importantes aeroportos para uma análise e estudos de ventos.

Para validar o estudo, serão avaliados aeroportos existentes com alto índice de ventos cruzados, a fim de apresentar não conformidades nos modelos padrões aplicados e/ou estimados, comparando dois cenários: a orientação atual; e a orientação desenvolvida por modelo gerado após análise de dados coletados com o INMET - Instituto Nacional de Meteorologia e dados dispostos no site Windfinder.

2. PROJETO GEOMÉTRICO DE UM AERÓDROMO

O Projeto Geométrico de um aeródromo reúne as informações mais importantes de um projeto aeroportuário, as quais servem de base para a elaboração de todos os demais projetos de infraestrutura, devendo conter os elementos fundamentais alinhados com a regulamentação em vigor (SAC/MINFRA-ITA, 2021).

Dentre os elementos geométricos que configuram um aeroporto estão os Dados de Vento (Anemograma), que devem ficar destacados em um Memorial Descritivo.

Conforme o Manual de Projetos Aeroportuários (SAC/MINFRA-ITA, 2021) o Anemograma apresenta-se na forma de um gráfico de intensidade, direção e duração dos ventos que servirá para avaliar a direção da Pista de Pouso e Decolagem - PPD, com base em dados disponíveis no sítio do Instituto Nacional de Meteorologia de estações meteorológicas da região do local da obra.

A orientação da pista é um dos pontos chave dos projetistas de infraestruturas aeroportuárias. Provavelmente o mais antigo, o mais básico e a característica fundamental de um aeroporto são a sua configuração e orientação de pista (WELLS, 1992).

Orientação é o ângulo que a linha central faz com o azimute. Este é um dos problemas presentes desde os primórdios da aviação, quando as aeronaves pousavam em pistas de terra e de grama (conhecida como a fase da infância da aviação), com pilotos guiados pela direção do vento, indicados pelo instrumento biruta (PAMPLONA; ALVES, 2013). Instrumento que indica a direção e velocidade do vento, orientando pilotos, controladores de tráfego aéreo e outros profissionais do aeródromo (BANDEIRA, 2023).

Por declinação magnética entende-se que é o ângulo formado entre o meridiano verdadeiro e o meridiano magnético; ou também pode ser identificado como desvio entre o azimute ou rumo verdadeiros e os correspondentes magnéticos (PASTANA, 2017).

Entende-se por Azimute o ângulo horizontal formado entre a direção Norte/Sul e o alinhamento em questão (neste estudo, seria o eixo da PPD). É medido a partir do Norte, no sentido horário (à direita), podendo variar de 0º a 360º.

A declinação magnética varia com o tempo e com a posição geográfica, podendo ser ocidental (δW), negativa quando o polo magnético estiver a oeste (W) do geográfico e oriental (δE) em caso contrário (PASTANA, 2017).

A Figura 1 mostra graficamente a transformação de elementos (rumos e azimutes) com orientação pelo Norte Verdadeiro (NV) ou Magnético (NM) é um processo simples, basta somar algebricamente a declinação magnética (na Figura 1 simbolizado pela letra D).

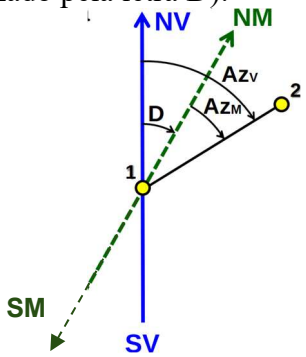


Figura 1 Transformação de Norte Magnético em Geográfico e vice-versa. Fonte: Pastana (2017).

Quando conhecemos os azimutes dos alinhamentos, podemos facilmente, a partir deles, determinar os rumos correspondentes, através de simples relações geométricas, bastando para isso observar que: a partir do Norte, os rumos crescem no sentido horário para E, e no anti-horário para W; e a partir do Sul crescem no sentido anti-horário para E, e horário para W (Figura 2).

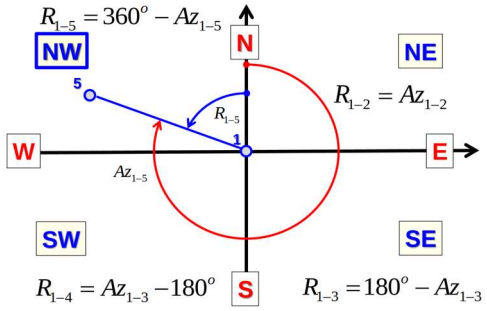


Figura 2 Rumos e Azimutes em cada quadrante. Fonte: Pastana (2017).

Por convenção, a contagem dos rumos tem como origem o ponto Norte (N) ou o ponto Sul (S) e a sua variação é de 0º a 90º. Portanto, o rumo não possui valor negativo, porém, é obrigatória a designação do quadrante a que pertence o ângulo azimutal no sistema polar.

A Equação 1 mostra o cálculo do rumo magnético (RM) de pista a partir do rumo verdadeiro (RV) do vento (DEL FIANCO et al., 2017). O RV é determinado a partir do estudo estatístico dos dados da direção do vento, obtidos para aquela região ao longo do tempo, através de um Anemograma, gráfico que é construído no sistema polar, representando fenômenos direcionais.

$$RM = RV - [\delta ø + V \times (T - Tø)] \quad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

- RM: rumo magnético (graus);
- RV: rumo verdadeiro (graus);
- δø: declinação magnética do ano inicial;
- V: variação anual da declinação magnética;
- T: ano em questão (atual); e
- Tø: ano com dado conhecido.

Para o caso do Brasil, para os locais onde a declinação magnética for negativa, o Rumo Magnético situa-se a oeste do Rumo Verdadeiro (Equação 2). Assim, desprezando a variação anual e a diferença entre anos, temos que o RM (graus) é obtido como na Equação 3:

$$RM = RV - (-\delta) \quad \text{(Eq. 2)}$$
$$RM = RV + \delta \quad \text{(Eq. 3)}$$

De acordo com o RBAC 154 EMD 07 (ANAC, 2021), muitos fatores afetam a determinação da orientação, localização e o número de pistas de pouso e decolagem. Um dos mais importantes é o *fator de utilidade*, determinado pela distribuição do vento. Ainda segundo o RBAC 154 - Apêndice G, existem fatores que devem ser mais frequentemente estudados, divididos em 4 grupos:

i) Tipo de operação: IFR ou VFR 24h ou somente diurno;

ii) Condições climatológicas - estudo da distribuição de ventos para determinar o fator de utilização e componentes máximos de ventos médios de través;

iii) Topografia do aeródromo e entorno;

iv) Tráfego aéreo do entorno do aeródromo.

Este estudo tem como foco o fator de utilização e o fator *ii) Condições*

climatológicas - estudos de ventos, a fim de observar se a orientação de pista obtida através dos dados estudados, baseada nesse conceito, está em acordo com a orientação atual das pistas de pouso e decolagem dos locais propostos.

Atualmente, os projetos de aeroportos seguem a recomendação da ICAO em seu Anexo XIV (*International Civil Aviation Organization*) onde a orientação de uma pista deve ser capaz de atender 95% de operacionalidade anual, considerando a componente permitida de vento cruzado em uma pista (HORONJEFF et al., 2010).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho inclui: a escolha dos aeroportos, a obtenção e análise do banco de dados; e os passos necessários para alcançar os resultados.

3.1 Escolha dos Aeroportos

Foram escolhidos três aeroportos de estudo com a intenção de analisar as respectivas orientações de pista: (i) Aeroporto Internacional de Guarulhos/São Paulo (SBGR), principal porta de entrada internacional do País, localizado na região sudeste, com duas pistas paralelas escalonadas (Pista 10L-28R, com 3700 m de comprimento por 45 m de largura; e Pista 10R-28L, com 3000 m de comprimento por 45 m de largura) (DECEA, 2022); (ii) Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes (SBRF), um dos principais aeroportos turísticos do País, localizado na região nordeste, apresenta configuração de pista única de 2751 m de comprimento por 45 m de largura (DECEA, 2023); e (iii) Aeroporto Regional de Barreiras/Bahia (SNBR), por ser aviação regional, um dos maiores centros econômicos e principal polo educacional e tecnológico da Bahia, e pela sua condição excepcional de direções e intensidades de ventos. O Aeroporto de Barreiras contava com quatro pistas de pouso e decolagem que se cruzavam no centro. Atualmente, porém, apenas uma está ativa e sendo utilizada, Pista 08-26, com 1605 m de comprimento por 30 m de largura. A cabeceira 08 apresenta maior frequência de pousos e a 26 maior frequência de decolagens.

Todos os aeroportos citados apresentam reportes de ocorrências devido à alta taxa de ventos cruzados existentes em suas pistas.

3.2 Etapas da Pesquisa Metodológica

Para fins estudos que permitam entender, teorizar e analisar as orientações de pista atuais e os modelos gerados após análise de ventos e suas respectivas curvas probabilísticas. Desse modo, pretende-se analisar 3 variáveis (ASHFORD et al. 2011):

i) vento, direção horária;
ii) vento, rajada máxima (nó/s); e
iii) vento, velocidade horária (nó/s).

Dentro das que foram obtidas e tratadas nos dados meteorológicos do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, colhidos de duas estações automáticas: Barreiras e Recife; e duas convencionais: Barreiras e Guarulhos, a fim de gerar anemogramas de ventos destes locais utilizando linguagem Python, e análises de curvas de distribuição probabilística e estatística.

Serão gerados modelos após análise de ventos e suas respectivas curvas probabilísticas, buscando entender como e qual destes modelos pode melhor descrever o comportamento dos principais ventos médios locais e a influência resultante na orientação das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos de estudo.

3.3 Tratamento dos Dados Meteorológicos

Para idealizar esta pesquisa, utilizou-se duas bases de dados meteorológicos existentes para análise dos ventos, uma que disponibiliza dados abertos: INMET, que traz uma vasta série de registros meteorológicos nacionais disponíveis por cidade e estação meteorológica - automática e/ou convencional, e as variáveis de ventos analisadas foram os dados de: direção, rajada máxima e velocidade horária.

Esses dados foram obtidos, primeiramente do site do INMET, no mês de junho/2023, e posteriormente foram solicitados novamente via e-mail nos dias 15 e 16/08/2023, com o intuito de verificar mais informações dos dados quando solicitados. Adicionalmente, foram obtidos os dados nos sites: *Windfinder* - que gera análises mensais e em tempo real bastante robustas, trazendo

informações de direção e velocidade dos ventos. Foram observados parâmetros de referência dos dados do INMET.

Para garantir a qualidade das análises, foram realizados tratamentos no banco de dados oficiais, conforme descrito, com o objetivo de suprimir possíveis erros de digitação e valores incongruentes que poderiam impactar e distorcer as análises realizadas. Após tratamento de dados, foram obtidos 20.976 mil linhas de dados: Aeroporto de Barreiras - 68272; Aeroporto de Guarulhos - 83721; e Aeroporto de Recife/Guararapes - 58293, com os seguintes horizontes temporais para os 3 aeroportos: Guarulhos e Barreiras - 10 anos que correspondem de 31/07/2013 a 31/07/2023, Guararapes-Recife - que corresponde 31/07/2013 à 12/11/2021, horizonte temporal de 8 anos por ausência de dados nos últimos dois anos.

As análises e o pré-processamento dos dados foram realizados em ambiente Python com auxílio da biblioteca *Pandas* juntamente à biblioteca *Windrose*, responsável por criar os anemogramas.

A direção e a velocidade dos ventos, que são os elementos-foco essenciais desta pesquisa, foram tratados em um *data frame*, de forma a padronizá-los, visto que estavam com títulos e tipagem de dados diferentes, além de haver divisões entre rajada máxima e vento horário.

Com estas duas colunas, criou-se uma nova com o seguinte critério: se existir rajada máxima substitua pelo vento horário, caso não mantenha o mesmo, pois os ventos de alta intensidade geram riscos às operações aeroportuárias, por fim as velocidades dos ventos foram convertidas de m/s, para nó (knot).

Vale a pena ressaltar que durante o desenvolvimento metodológico, os dados do INMET não foram lidos diretamente com a biblioteca *Pandas*, pois estavam em "*unicode"* desconhecido e diferente do padrão UTF-8 (8-bit *Unicode Transformation Format*), apesar que apontam para o ANSI (*American National Standards Institute*), mas, mesmo com este unicode o problema de leitura ainda persistia.

Desta forma o tratamento inicial foi realizado com funções nativas do Python para trabalhar diretamente com arquivos pela limitação do unicode, após isso os dados foram lidos pela biblioteca *Pandas*.

Outro ponto que trouxe muitas dificuldades para a análise, foi a duplicidade dos dados baixados do INMET pois, em um dos banco de dados havia 420 mil linhas de dados brutos e retirando os duplicados, restaram somente 58 mil linhas, além das datas e horas fora de padrão, em que iniciaram anotando de uma forma (12:00:00) e terminaram de outra (1200 UTC), valores negativos de 4ª ordem, dados que causavam distorções na análise, portanto a eliminação destes ruídos, é de extrema importância e a limpeza nos dados faz essencial para se obter uma análise mais rica e veraz.

As Tabelas 1 e 2 elencam os tipos de dados do estudo.

Tabela 1 Dados recebidos. Fonte: INMET, 2023.

DADOS DISPONIBILIZADOS PELO INMET - BDMEP				
Descrição dos dados				
Nome	SÃO PAULO (MIR.de SANTANA)	GUARARAPES	BARREIRAS	
Local	São Paulo	Recife- PE	Bahia	Bahia
Código IATA	GRU	REC	BRA	BRA
Código ICAO	SBGR	SBRF	SNBR	SNBR
Codigo Estação	83781	A301	83236	A402
Latitude	-23,49638888	-8,05916666	-12,15583333	-12,12472221
Longitude	-46,61999999	-34,95944444	-45,00833333	-45,02694443
Altitude	785,16	10	447,51	474,17
Situação	Operante	Operante	Operante	Operante
Data Inicial	1975-01-01	21/12/2004	01/01/1961	19/12/2001
Data Final	2023-09-17	2023-09-17	17/09/2023	17/09/2023
Periodicidade da Mediçãc	Horária	Horária	Horária	Horária

Tabela 2 Variáveis escolhidas. Fonte: INMET, 2023.

VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS RECEBIDAS E VARIÁVEIS ESCOLHIDAS	
1. Data da medição	13.Temperatura do ar - bulbo seco, horária (â°c)
2. Hora da medição	14.Temperatura do ar - bulbo úmido, horária (â°c)
3. Ch (nuvens altas) (código)	15.Temperatura do ponto de orvalho (â°c)
4.Cl (nuvens baixas) (código)	16.Temperatura máxima na hora ant. (aut) (°c)
5.CM (nuvens medias) (código)	17.Temperatura mínima na hora ant. (aut) (°c)
6.Nebulosidade, horaria (décimos)	18.Umidade rel. Max. Na hora ant. (aut) (%)
7.Precipitacao total, horário (mm)	19.Umidade rel. Mín. Na hora ant. (aut) (%)
8.Pressao atmosférica ao nível da estação, horaria (mb)	20.Umidade relativa do ar, horária (%)
9.Pressao atmosférica ao nível do mar, horaria (mb)	**21.Vento, direção horária (gr) (° (gr))**
10.Pressão atmosférica max.na hora ant. (aut) (mb)	**22.Vento, rajada máxima (nó/s)**
11.Pressão atmosférica min. Na hora ant. (aut) (mb)	23.Vento, velocidade horária (m/s)
12.radiacao global (kj/m²)	**24.Vento, velocidade horária (nó/s)**
	25.Visibilidade, horária (código)

3.4 Tratamento Estatístico dos Dados

Uma vez com o banco de dados tratado e normalizado, buscou-se os dados de declinação magnética dos aeroportos selecionados, obtidos através do N.O.A.A (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), segundo site oficial.

Sabendo que a declinação magnética da Terra, sofre interferências das correntes de convecção geradas pelos movimentos das placas tectônicas e do seu campo magnético, tem-se alteração da posição dos ventos além das interferências climáticas como *El Niño* e *La Niña* no Pacífico resultando em extremos climáticos ao redor do globo (PORTILLO, 2019).

A declinação magnética foi calculada no site N.O.A.A. utilizando a latitude e longitude dos locais obtidas via Google Earth®. Com os dados da declinação magnética dos três sítios aeroportuários selecionados e os dados dos ventos locais, buscou-se produzir os anemogramas e análises gráficas e a posteriori curvas de distribuição probabilística das velocidades e das frequências de ventos locais que nos permitam entender como se comportam estes ventos ao decorrer do horizonte temporal proposto.

Foram escolhidos quatro tipos de distribuições para analisar os dados de ventos, sendo: a primeira delas a **Distribuição Generalizada de Valores Extremos** (*Generalized Extreme Value Distribution - GEV*) com o propósito de identificar eventos excepcionalmente extremos conforme o trabalho de Bali (2003) demonstra, buscando analisar assim casos raros e de baixa probabilidade de ocorrência, como ventos fortes.

O segundo tipo de distribuição analisada é a de **Weibull**, e de acordo Lai *et al* (2006) apontam, Weibull é uma ferramenta estatística comumente usada em análises de confiabilidade e sobrevivência e para análise de falhas de um produto. Esta curva apresenta as mesmas características da curva *GEV,* que é para eventos extremos, tais como os eventos de baixa probabilidade de ocorrência, contribuindo para esse tipo de análise, que é crucial para tomar decisões sobre infraestrutura, e para avaliar riscos e eventos climáticos extremos, contribuindo para decisões informadas sobre as condições climáticas locais.

Para a terceira distribuição, será analisada a distribuição **Log-Normal**, que é uma ferramenta estatística essencial em diversas áreas, tais como medicina, biomedicina e economia como apontam Gupta *et al* (2006). Um ponto a se atentar é sobre séries de números negativos, já que não existe log de números negativos, pois não existem valores de ventos negativos e ventos de valor zero foram removidos da análise para evitar dados infinitos, já que log de zero é infinito. Sua importância reside na capacidade de descrever e compreender dados que não seguem uma distribuição normal padrão, oferecendo insights valiosos para análises estatísticas e tomada de decisões.

Por último, será analisada a distribuição de **Gumbel**, já que ela é amplamente utilizada em casos hidrológicos de modelagem extrema de precipitação conforme aponta Koutsoyiannis (2003). Assim a curva de Gumbel também virá para analisar casos de ventos raros de acontecer, conforme as curvas anteriores.

Desta forma, a análise das quatro curvas objetiva identificar aquela que melhor representa a distribuição dos ventos para cada aeroporto em estudo, visto que uma determinada distribuição que descreve um local não necessariamente descreve outro por conta das particularidades de cada local.

A finalidade é verificar qual ou quais seriam a melhor escolha de distribuição de probabilidade e que descrevem mais

assertivamente aquele local, e que de certa maneira podem servir para auxiliar na previsão de eventos indesejáveis futuros, buscando melhorar a operacionalidade e a segurança das operações aeronáuticas.

3.5 Análise de Ventos com Anemogramas desenvolvidos no Estudo

Os dados coletados e processados foram utilizados na biblioteca *Windrose* para criar três variáveis cruciais: i) a direção do vento em graus; ii) a magnitude do vento em nós; e iii) frequência de ocorrência (tamanho das cores nas barras).

Devido às limitações de personalização, foram realizadas adaptações internas no código base da biblioteca para atender aos padrões do RBAC 154 - Emenda nº07 - Apêndice G (ANAC, 2021).

Para a escolha da máxima Componente Permissível de Vento Cruzado, a RBAC nº 154 (ANAC, 2021) recomenda que o pouso ou a decolagem de aviões é impossível, em condições normais, quando:

- no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista é maior ou igual a 1500 m, exceto quando houver, com certa frequência, uma baixa ação de frenagem na pista devido a um coeficiente de atrito longitudinal insuficiente, quando, deve ser assumido um componente de vento de través que não exceda 24 km/h (13 kt);
- 24 km/h (13 kt), no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista é maior ou igual a 1200 m e menor que 1500 m;
- 19 km/h (10 kt), no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista for menor que 1200 m.

Pré-definidos os intervalos padrões de velocidade de ventos para Anemograma, segundo RBAC nº 154 (ANAC, 2021), temos: 0-3, 3-13, 13-25, 25-40 e > 40, pistas com CBP maior ou igual à 1500 m (envolve todos os casos analisados).

Para efeito de análise com os dados coletados, temos que o valor máximo admissível de componentes transversais de través é de 20 kt, portanto foi incluído o anel de 20 kt, ficando assim: 0-3, 3-13, 13-20, 20-25, 25-40 e > 40 a configuração de anéis de velocidades dos ventos.

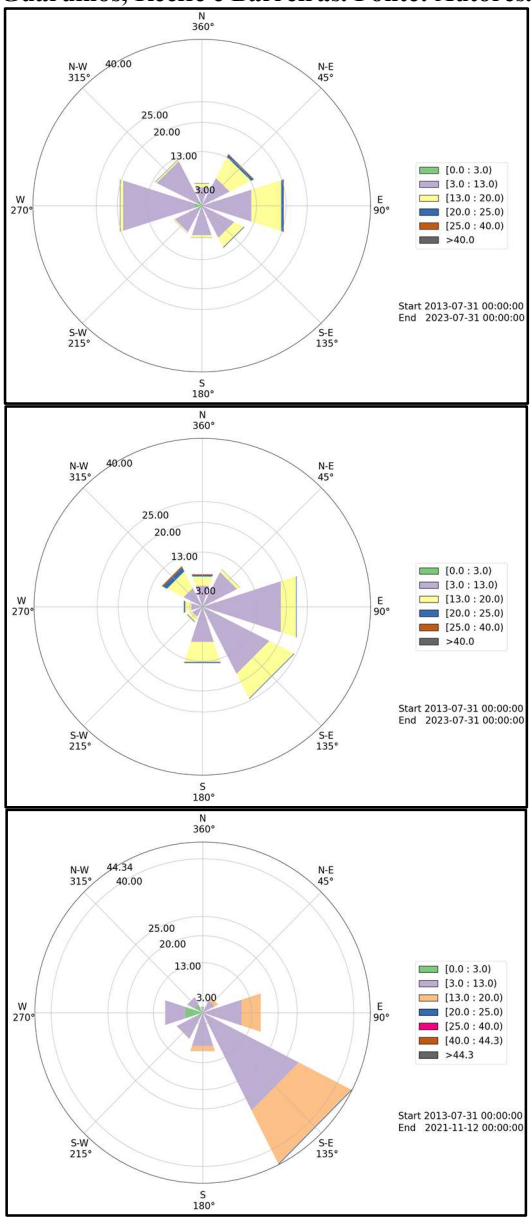
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Anemogramas Obtidos

Após tratamento dos dados (descritos no tópico 3.2), gerou-se anemogramas para os três aeroportos, conforme as Figuras 3, 4 e 5.

Pode-se observar que os dados tratados proporcionaram uma representação mais robusta das condições dos ventos dos últimos 10 anos para Guarulhos e Barreiras e 8 anos para Recife, e tornou possível a análise comparativa da orientação de pista junto com a declinação magnética atualizada. Assim será possível comparar a atual direção e orientação de pista com a simulação dos dados reais e atuais analisados.

Figuras 3, 4 e 5 Anemogramas gerados para Guarulhos, Recife e Barreiras. Fonte: Autores.



4.2 Resultados da Declinação Magnética

Para uma orientação de pista ideal, é imprescindível que a declinação magnética do local seja observada, assim, a latitude e a

longitude dos locais estudados foram obtidas via Google Earth®, e inseridas na calculadora do N.O.A.A. que retorna o valor da declinação magnética para a data escolhida, neste estudo.

Optou-se pelas datas mais atuais: 19 e 20/09/2023, para juntamente aos anemogramas gerados observar e comparar a orientação de pista atual - operante, com a orientação gerada e sugerida após análise.

A Tabela 3 ilustra a síntese dos dados das declinações magnéticas dos locais de análise.

Tabela 3 Declinações magnéticas dos aeroportos em estudo. Fonte: Autores.

DECLINAÇÃO MAGNÉTICA DOS LOCAIS PROPOSTOS						
	PISTA ATUAL			PISTA MODELADA		
Local	Guarulhos	Recife	Barreiras	Guarulhos	Recife	Barreiras
Data	20/01/1985	18/01/1953	01/01/1937	20/09/2023	19/09/2023	19/09/2023
Modelo utilizado	IGRF2020	IGRF2020	IGRF2020	WMM-2020	WMM-2020	WMM-2020
Latitude	23°26'06" S	08°08'31" S	12°04'46" S	23°26'06" S	08°08'31" S	12°08'11" S
Longitude	46°27'44" W	34°55'03" W	45°00'35" W	46°27'44" W	34°55'03" W	44°58'35" W
Declinação magnética	17°16' W	20°51' W	13°59' W	21°54' W	21°28' W	22°32' W
Mudança anual	0°06'	0°03'	0°06'	0°06'	0°06'	0°02'
Incerteza	não listado	0°22'	não listado	0°25'	0°22'	0°22'

De acordo com N.O.A.A., os modelos de campo atuais, como o IGRF e World Magnetic Model (WMM) são precisos para dentro de 30 minutos de arco para a declinação, porém, anomalias locais superiores a 10 graus, embora raras, existem.

4.3 Porcentagem dos Ventos e Fator de utilização de Pista

Após o tratamento dos dados do INMET, foi possível gerar tabelas com as porcentagens da frequência e da direção dos ventos dos locais propostos com o intuito de estimar um fator de utilização e sua influência na orientação de pista encontrada na análise.

A Tabela 4 ilustra os percentuais de ventos dentro e fora da pista de pouso e decolagem (PPD) e o fator de utilização para as análises modeladas dos ventos nos aeroportos de estudo, e são dados de saída gerados na análise em Python que norteiam todo este estudo e a orientação das pistas sugeridas. A Tabela 5 fornece a porcentagem e a orientação dos ventos nos locais de estudo.

Tabela 4 Fator de utilização.

Fonte: Autores.

AEROPORTO	LOCALIZAÇÃO DO VENTO	N-S	W-E	NE-SW	SE-NW	TOTAL (%)	FATOR DE UTILIZAÇÃO
GUARULHOS	DENTRO PPD	14,5650	30,8250	15,0100	36,6460	97,0460	**0,9705**
	FORA PPD	0,3614	0,5810	0,2950	1,7170	2,9544	0,0200
RECIFE	DENTRO PPD	10,5620	26,9050	12,5000	49,5020	99,4690	**0,9947**
	FORA PPD	0,0330	0,2610	0,0120	0,2250	0,5310	0,0053
BARREIRAS	DENTRO PPD	8,4340	42,7290	21,9930	24,7410	97,8970	**0,9790**
	FORA PPD	0,0760	0,8200	0,8555	0,3510	2,1025	0,0210

Tabela 5 Porcentagem de velocidade e orientação média dos ventos. Fonte: Autores.

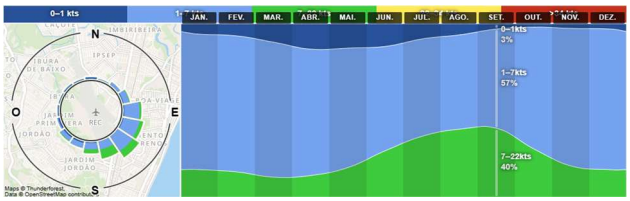
PORCENTAGEM DE VELOCIDADE DOS VENTOS							
GUARULHOS - SP - SBGR							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	0,18	5,25	4,83	1,16	0,36	0,00	11,79
W	0,13	2,86	1,63	0,31	0,09	0,00	5,03
SW	0,12	2,86	1,29	0,13	0,06	0,00	4,48
S	0,28	9,25	5,43	0,29	0,07	0,00	15,32
SE	0,46	18,99	7,13	0,17	0,02	0,00	26,77
E	0,62	20,73	4,12	0,16	0,02	0,00	25,65
NE	0,79	9,28	0,80	0,07	0,02	0,00	10,96
Total	2,59	69,22	25,23	2,30	0,64	0,01	100,00
GUARARAPES - RECIFE - SBRF							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	2,46	2,18	0,03	0,00	0,00	0,00	4,67
W	4,87	5,69	0,04	0,00	0,00	0,00	10,59
SW	1,39	6,34	0,13	0,00	0,00	0,00	7,86
S	0,50	8,77	1,37	0,03	0,00	0,00	10,67
SE	0,20	28,81	15,87	0,22	0,00	0,00	45,09
E	0,11	10,88	5,39	0,02	0,00	0,00	16,41
NE	0,16	3,46	1,06	0,01	0,00	0,00	4,70
Total	9,68	66,13	23,89	0,29	0,01	0,00	100,00
BARREIRAS - BAHIA - SNBR							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	1,58	11,01	0,38	0,08	0,05	0,00	13,10
W	2,22	18,83	0,72	0,12	0,03	0,00	21,92
SW	1,02	6,54	0,30	0,04	0,02	0,00	7,92
S	0,82	6,97	0,64	0,06	0,01	0,00	8,51
SE	0,54	8,60	2,64	0,18	0,04	0,00	11,99
E	0,48	12,92	7,57	0,57	0,09	0,00	21,63
NE	0,39	7,97	5,77	0,66	0,14	0,00	14,93
Total	7,04	72,83	18,03	1,72	0,38	0,00	100,00

4.4 Orientações de Pistas Propostas

Com os dados analisados, foi possível realizar o comparativo na orientação de pista/numeração de pistas.

Para efeitos de comparação, também foram observados para a análise com os dados mensais e diários de orientação e velocidade de Guarulhos, Recife e Barreiras respectivamente, gerados pelo Windfinder® para auxiliar nas análises, como o Anemograma de Recife ilustrado pela Figura 6, representando a distribuição e frequência dos ventos do mês 09/2023. Esta análise se deu em todos os locais estudados.

Figura 6 Anemograma mensal do Aeroporto de Recife. Fonte: Windfinder, 2023.



Por fim, plotou-se os Anemogramas e fez-se os cálculos para encontrar o melhor resultado de orientação de pista, a orientação ideal sugerida é mais próxima das necessidades reais destes aeroportos - considerou-se os dados dos ventos e da declinação magnética nos locais propostos.

Podemos observar na Tabela 6 que, após rodarmos as análises com os dados obtidos no horizonte temporal proposto - 8 anos para Recife e 10 anos para Guarulhos e Barreiras, eles nos fornecem uma orientação de pista com uma diferença angular da atual, isto mediante o estudo das frequências e orientação da distribuição dos ventos nos locais propostos, mostrando a importância deste tipo de análise dado à importância que os dados de ventos têm para a segurança operacional nos aeroportos, principalmente no que tange os procedimentos de pouso e decolagem, responsáveis por mais de 40% dos acidentes e incidentes aeronáuticos.

Tabela 6 Comparativo da orientação de pista: Atual x modelada, o Modelo Python.
Fonte: Autores.

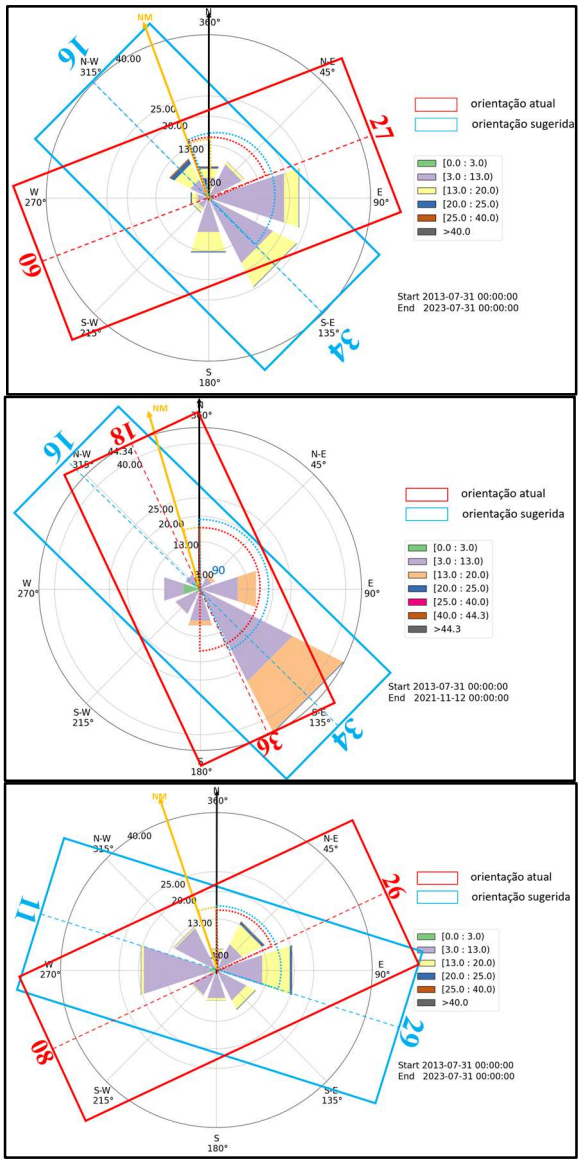
DATA DOS DADOS	AEROPORTOS	DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	RUMO MAGNÉTICO (RM)	CABECEIRAS PPD	PISTAS ATUAL X MODELADA
			PISTA ATUAL		
20/01/1981	Guarulhos	17°16' W	73° + 17°16' W = 90°16'	09 — 27*	
18/01/1953	Recife	20°51' W	161° + 20°51' W = 181°51'	18 — 36	
01/01/1937	Barreiras	13°59' W	62° + 13°59' W= 75°59'	08 — 26	
			PISTA MODELADA SUGERIDA		
20/09/2023	Guarulhos	21°54' W	135° + 21°54'W = 156°54'	16 — 34	47°09'00"
19/09/2023	Recife	21°28' W	135° + 21°28' W = 156°28'	16 — 34	25°23'00"
19/09/2023	Barreiras	22°32' W	90° + 22°32' W= 112°32'	11 — 29	36°33'00"

*Atualizada em *08/09/2022.

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram respectivamente as orientações de pista atuais e sugeridas respectivamente para Guarulhos, Barreiras e Guararapes.

Figuras 7, 8 e 9 Anemogramas comparativos da orientação de pista atual x pista modelada: Aeroportos de Guarulhos, Recife e Barreiras.

Fonte: Autores.



4.5 Curvas de Distribuição dos Ventos

Dentre as curvas plotadas para os ventos do Aeroporto de Guarulhos, a que mais se ajusta conforme a Figura 10 é a distribuição de ***Weibull*** com parâmetros *Loc:* 2.3453 *e Scale:* 11.9246. Isso se deve a três fatores. Primeiro, está mais centralizada nos eixos das abscissas em relação aos dados, comparado com as demais curvas. Segundo o seu ajuste de altura perante todas as barras do histograma, pois há dados de frequência diversos e a *Weibull* está entre a concentração dos dados abaixo da curva e dos dados dispersos acima da curva, deixando-a com a abrangência maior nos dados.

Por último, sobre os ventos abaixo de 5 kt e ventos acima de 15 kt, sua cauda está acima das demais curvas, demonstrando que nessas regiões extremas seu ajuste foi melhor

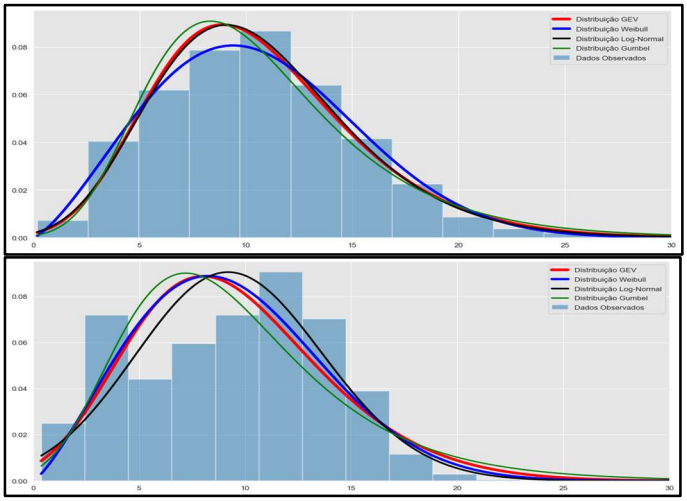
que as demais, aferindo melhor os casos de baixa probabilidade.

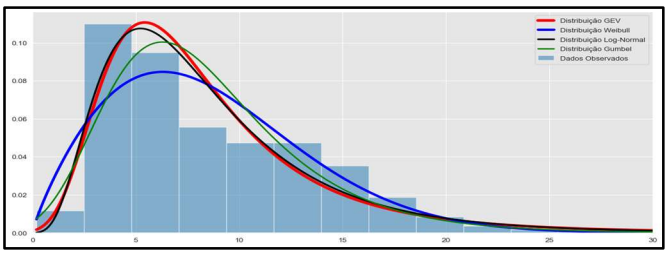
No caso dos dados do Aeroporto de Recife, Figura 11, é observável a presença de dois picos. Além disso, na faixa central onde as curvas foram ajustadas, não existe um horizonte de eventos que reforcem um ajuste ótimo para as curvas probabilísticas usadas. Entretanto, levando em consideração que o primeiro pico são ventos de 5 kt, isso não fará um impacto significativo na operação aeroportuária, já que é aceitável um limite.

Já para as curvas plotadas para os ventos do Aeroporto de Barreiras, a que mais se ajusta, conforme a Figura 12, é a distribuição de Gumbel com parâmetros *Mu:* 8.3387 *e Beta:* 4.0524.

Isso se deve ao fato de que foi bem ajustada para eventos de alta probabilidade de ocorrência tais como ventos acima de 5 kt, e representa razoavelmente bem os eventos raros, ficando atrás somente da curva Weibull para ventos acima de 13 kt já que curva Weibull passa acima da Gumbel, desta forma tendo boa representatividade sobre os dados coletados, melhor visualização, isso suprime eventos raros tais como os acima de 40 kt que podem ser vistos nos anemogramas supracitados.

Figuras 10, 11 e 12 Curvas de distribuição - Aeroporto de Guarulhos, Recife e Barreiras - SP.
Fonte: Autores.





Portanto, dentre os dados apresentados para o aeroporto de Recife, a curva que mais se ajusta é a curva de Log-Normal, pois, tem boa centralidade para os eventos acima de 10 kt comparadas com as demais, além do que ela está acima das outras curvas, logo sua representatividade sobre a probabilidade de ocorrência desses ventos é mais eficiente.

Por fim, obteve-se como síntese dos resultados desta seção, a Tabela 7, consolidando as curvas que tem uma maior representatividade perante os dados coletados de seu respectivo aeroporto no horizonte de eventos de 10 anos selecionado.

Tabela 7 Curvas de distribuição.
Fonte: Autores.

Aeroporto	Curva	Média	Covariância (%)	Desvio padrão
Guarulhos	Weibull	0.02099	139.36%	0.02820
Barreiras	Gumbel	0.02168	146.98%	0.03187
Recife	Log-Normal	0.02392	131.15%	0.03138

Tal escolha influencia diretamente na segurança das operações aéreas, ao estabelecer limites de vento seguros para pousos e decolagens, bem como na eficiência operacional ao otimizar rotas de voo e determinar o fator de utilização do respectivo aeroporto.

Também é crucial para avaliar riscos climáticos, apoiando a tomada de decisões em caso de eventos climáticos extremos, contribuindo para um planejamento mais seguro, eficiente e eficaz das operações aeroportuárias.

A Tabela 8 ilustra os resultados das análises baseadas nos dados do INMET e demonstram o percentual de ventos frontais, través e de cauda para a pista atual e para a pista modelada, ilustrando o percentual comparativo de aproveitamento de ventos da pista atual e da pista modelada dos locais em análise.

Tabela 8 Percentual de ventos dos locais propostos. Fonte: Autores.

GUARULHOS												
VENTOS PREDOMINANT	ESE-WNW	NE-SW	N-S	SE-NW	ENE-WSW	NNE-SSW	SSE-NNW	W-E	%VENTOS TOTAIS	%VENTOS FRONTAIS	%VENTOS CAUDA	%VENTOS TRAVÉS
DENTRO PPD	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837	96,136			
FORA PPD	0,684	0,191	0,296	1,158	0,220	0,273	0,730	0,311	3,864			
ATUAL (09—27)	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837		41,760	9,363	45,012
MODELADA (16—34)	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837		77,959		18,177
RECIFE												
DENTRO PPD	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022	99,751			
FORA PPD	0,003	0,005	0,013	0,192	0,003	0,021	0,000	0,013	0,249			
ATUAL (18—36)	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022		53,575	8,037	38,139
MODELADA (16—34)	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022		90,267	8,037	9,484
BARREIRAS												
DENTRO PPD	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467	97,906			
FORA PPD	0,087	0,539	0,036	0,154	0,555	0,205	0,080	0,437	2,094			
ATUAL (09—27)	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467		82,068		15,838
MODELADA (16—34)	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467		89,856		8,050

5. CONCLUSÕES

Com os resultados das análises, observou-se que os aeroportos mais afetados pela ação dos ventos para procedimentos de pouso e decolagem são Guarulhos (SBGR) 40° e Barreiras (SNBR) 30°, enquanto o aeroporto de Guararapes (SBRF) apresenta a menor variação angular 20°, como relatado pela ANAC e pilotos em registros de ocorrências de voos, o que compromete a segurança e a operacionalidade de acordo com as normas da ICAO.

A proposta final do artigo consistiu em desenvolver um modelo utilizando análise de dados, estruturação e tipagem das informações de direção, frequência e velocidade dos ventos, empregando a linguagem Python e suas bibliotecas de análise de dados. O objetivo central foi evidenciar as discrepâncias na orientação das pistas de aeroportos existentes em relação à direção dos ventos atuais e avaliar o possível impacto desses parâmetros sobre o cumprimento das diretrizes de operacionalidade estabelecidas pela ICAO, que preconiza 95% de eficiência operacional.

Para os locais analisados, a orientação de pista proposta seguiu de maneira e termos o melhor fator de utilização, onde alcançamos o índice de 0,9947 para Guararapes-Recife, 0,9705 para Guarulhos-SP e 0,9790 para Barreiras-BA.

De acordo com a tabela 8, os locais que mais tiveram números significativamente positivos foram: Guarulhos, com redução de 75,13% de ventos de través, aumento de 86,68% nos ventos frontais e os ventos de cauda se mantiveram em 9,363%. Para Recife temos uma redução de 59,62% nos ventos de través, aumento de 68,49% nos ventos frontais e os ventos de cauda se mantiveram no patamar, enquanto para Barreiras houve uma redução de 50,692% nos ventos de través e os ventos frontais um aumento de 9,498% e os ventos de cauda foram pouco significativos na análise mediante à sua baixa frequência no horizonte temporal. Vemos assim, que o modelo pode se dizer que cumpriu sua função, pois conseguiu trazer melhorar muito significativas nos ventos frontais, melhorando o aproveitamento e dos ventos e a operacionalidade dos aeroportos, porém, muito mais que isso, foram os resultados bastante interessantes com relação à redução dos ventos de través, que colocam as operações de decolagem e pouso num patamar de menor segurança, dificultando o trabalho dos profissionais da aviação.

Para trabalhos futuros, recomendamos duas possíveis pesquisas, primeira é usar os mesmos dados de ventos disponíveis com mesmo tratamento inicial para aplicar a *Escala de Beaufort*, escala empírica que classifica a intensidade dos ventos, e buscar treinar um modelo de inteligência artificial para prever a classificação do próximo vento de 1 hora com dados passados, se a precisão for boa o bastante irá auxiliar pilotos de aeronaves a evitar horários de riscos, além de já ter um nível de confiança que não terá problemas no pouso com a aeronave.

Para um segundo ponto possível deste trabalho, consistiria em utilizar a curva de ventos característica do aeroporto identificada nesta pesquisa para realizar previsões relacionadas aos ventos futuros. Isso poderia abranger a identificação dos horários de maior risco, a análise dos meses com maior probabilidade de ocorrência de ventos críticos

e a avaliação da possibilidade de alteração do ângulo de pista ao longo do tempo. Além disso, seria possível determinar quando a mudança no ângulo da pista poderia ocorrer, o que forneceria insights sobre a potencial vida útil da pista existente ou projetada. Adicionalmente, seria relevante replicar as mesmas análises, concentrando-se exclusivamente em dados relacionados a condições chuvosas.

6. REFERÊNCIAS

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Rajadas de Vento. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/condicoes-meteorologicas-adversas-para-o-voo/rajadas-de-vento. Acesso em: 8 jul. 2023.

ANAC. PROJETO DE AERÓDROMOS. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL RBAC nº 154, EmD 07. julho, 2021. Disponivel em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-154/@@display-file/arquivo_norma/RBAC154EMD07%20-%20retificado.pdf

BANDEIRA, M. C. G. S. P. Orientação de pista. Material de aula, Curso de Aeroportos - Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, 57 slides, 2023.

BALI, Turan G. The generalized extreme value distribution. Economics Letters, [S. l.], v. 79, n. 3, p. 423–427, 2003. DOI: 10.1016/S0165-1765(03)00035-1. Acesso em: 12 abr. 2020. Acesso em: 10 jul. 2023.

CARDOSO, M. Pistas do aeroporto de Guarulhos já estão com nova numeração. 2022. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/pistas-do-aeroporto-de-guarulhos-ja-estao-com-nova-numeracao.htmlAcesso em: 18 set. 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. Carta de Aeródromo – RECIFE / Guararapes - Gilberto Freyre, INTL (SBRF). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2309A1. SET., 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. Carta de Aeródromo – RECIFE / Guararapes - Gilberto Freyre, INTL (SBRF). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2309A1. SET., 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. SÃO PAULO / Guarulhos - Gov. André Franco Montoro, INTL (SBGR). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2209A1. SET., 2022.

DEL FINCO, R.M.; SANTIAGO, C. L.; LOPES, L. A. S. Revisão das Dimensões das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – Rio De Janeiro. Anais do XXXI ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Área: Infraestrutura, Recife, p.1086-1097, 2017.

KAZDA, A.; CAVES, R. E. Airport design and operation. 2007.

GITHUB. Pandas Guide — Pandas Guide documentation. 2017. Disponível em: https://pandasguide.readthedocs.io/en/latest/. Acesso em: 15 jul. 2023.

GUPTA, R. C., & Li, X. (2006). Statistical inference for the common mean of two log-normal distributions and some applications in reliability. Computational Statistics & Data Analysis, 50(11), 3141–3164. DOI: 10.1016/J.CSDA.2005.05.005

HORONJEFF, Robert et al. Planning and design of airports. McGraw-Hill, 2010.

HUNTEER, John; DALE, Darren; FIRING, Eric; DROETTBOOM, Michael. Users guide — Matplotlib 3.5.2 documentation. 2002. Disponível em: https://matplotlib.org/stable/users/index.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome Design and Operations. 5. Ed. Montreal, 2009.

KOUTSOYIANNIS, Demetris. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In: Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna. 2003. p. 24-25.

LAI, C.-D., Murthy, D. N., & Xie, M. (2006). Weibull Distributions and Their Applications. Springer Handbook of Engineering Statistics, 63–78. doi:10.1007/978-1-84628-288-1_three

NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER. NCEI Geomagnetic Calculators. 2017. Disponível em: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true. Acesso em: 15 jul. 2023.

PAMPLONA; ALVES, C. J. P. a correta orientação de uma pista de pouso para o planejamento de um aeroporto. Ed. 6, vol. 1, artigo nº 1, Maio/Agosto de 2013.

PORTILLO, Germán. O que é declinação magnética, quão importante é e para que serve? 2019. Disponível em: https://www.meteorologiaenred.com/pt/declina%C3%A7%C3%A3o-magn%C3%A9tica.html. Acesso em: 16 jul. 2023.

PASTANA, C. E. T. Principais Requisitos de Topografia para Projeto de Estradas – 1/3. Aula 3: 200794 – Pavimentos de Estradas I. Unimar. 2017.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python Release Python 3.11.3. 2001. Disponível em: https://www.python.org/downloads/release/python-3113/. Acesso em: 15 jul. 2023.

SAC/MINFRA-ITA. MANUAL DE PROJETOS AEROPORTUÁRIOS. Parceria entre a Secretaria Nacional de Aviação Civil – SAC/MINFRA e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Versão 1.0, Brasília, DF: 2021.

WEATHER SERVICE US NATION. EARTH: uma mapa global do vento, tempo, e condições do oceano. 2023. Disponível em: https://earth.nullschool.net/pt/#current/wind/surface/level/orthographic=-69.46. Acesso em: 15 jul. 2023. WELLS, A. T. Airport planning & management. 1992. Acesso em: 10 jul. 2023.

WINDFINDER.COM. Windfinder - wind, wave & weather reports, forecasts & statistics worldwide. 2023. Disponível em: https://pt.windfinder.com/#4/-11.7383/-44.56