

Artigo

Cisalhamento do Vento no Aeroporto Internacional de São Paulo: Aspectos Observacionais e de Modelagem

Davi Pinto Ribeiro¹ , João Bosco Verçosa Leal Junior² , Gilberto Fisch^{1,3} ,
Diogo Nunes da Silva Ramos³ , Elizabeth Diane de Jesus Reuter⁴ 

¹*Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.*

²*Curso de Física, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

³*Divisão de Ciências Atmosféricas, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil.*

⁴*Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, Guarulhos, SP, Brasil.*

Recebido em: 30 de Abril de 2019 - Aceito em: 14 de Novembro de 2019

Resumo

Este trabalho visa abordar conceitos e efeitos do cisalhamento do vento, também conhecido como cortante do vento, tesoura de vento ou, em inglês, *windshear* (WS) e verificar a eficiência do modelo atmosférico WRF para simulação deste fenômeno. O estudo é dividido em duas partes, sendo uma observacional e outra de simulação computacional. A primeira consiste em identificar, através de estudos quantitativos, a ocorrência de tais eventos nas proximidades do Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos, utilizando-se de dados de perfil de vento obtidos pelo SODAR (*Sonic Detection And Ranging*), durante o período de 01 de janeiro de 2016 a 09 de junho de 2017. Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento obtidos da superfície até 520 m (aproximadamente 1700 ft) acima do solo e, com isso, foi feita uma análise estatística destas informações. A segunda parte consistiu em reproduzir as ocorrências de cisalhamento do vento no aeroporto em questão, através de 4 experimentos computacionais pelo modelo WRF. Obteve-se resultados próximos das observações em 2 deles, que se mostraram eficientes para prever a ocorrência da cortante do vento para os níveis de altura mais baixos, com antecipação aproximada de 11 a 13 h.

Palavras-chave: *Windshear*, cortante do vento, GRU Airport, SODAR, WRF.

Windshear at São Paulo International Airport: Observational and Modeling Aspects

Abstract

This work aims to approach the concepts and effects of windshear on the aircraft and to verify the efficiency of the WRF atmospheric model to simulate this phenomenon. The study is divided into two parts: observational and computational simulation. The first is to identify, through quantitative studies, the occurrence of such events in the vicinity of São Paulo International Airport at Guarulhos, using wind profile data obtained by the SODAR (*Sonic Detection And Ranging*) meteorological instruments, from January 1, 2016, up to June 9, 2017. Wind speed and direction data obtained from the surface up to 520 m (approximately 1700 ft) above the ground were used, and a statistical analysis was made of this information. The second part consisted in reproducing the occurrences of wind shear at the airport in question through 4 computational experiments by the WRF model, in order to reproduce a model for operational forecasting. The results obtained were closer to the observational ones in 2 of them, which were efficient to predict the occurrence of the windshear to the lower height levels, with approximate anticipation of 11 to 13 h.

Keywords: windshear, GRU Airport, SODAR, WRF.

1. Introdução

Diversos fatores meteorológicos cercam a aviação e trazem desafios diários aos pilotos quanto a evitarem as forças da natureza, principalmente aquelas advindas de tempestades - chuvas, granizos, raios e microexplosões (conhecidas em inglês como *microbursts*), que causam as temidas tesouras de vento, cortantes ou cisalhamento do vento, conhecidas em inglês pelo termo *windshear*. A sigla WS representará estes fenômenos ao longo deste texto.

Estes eventos representam grande perigo para a operação de aeronaves, principalmente a baixas altitudes e na aproximação final, fases do voo onde há pouca margem para correção de descidas ou subidas bruscas causadas por eventos inesperados. Segundo Brasil (2016), a decolagem e o pouso são as fases de operação em que ocorreram 34,95% dos acidentes entre 2006 e 2015.

Segundo o Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo de 2016 do DECEA, o Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos (SBGR) é o aeroporto com maior tráfego aéreo do país - foram registrados 272.141 pousos e decolagens no ano de 2016 - e, historicamente apresenta a maior quantidade de *reportes* de WS, conforme levantamento histórico feito de 1999 a 2013 (REDEMETS, 2013).

Brasil (2016) classifica estas ocorrências de acordo com a intensidade do cisalhamento vertical do vento, a saber: Leve: 0 a 4 kt/100 ft; Moderada: 5 a 8 kt/100 ft; Severa: 9 a 12 kt/100 ft e Extrema: > 12 kt/100 ft. As unidades normalmente utilizadas em Meteorologia Aeronáutica são em pés (ft) e nós (kt), sendo estas adotadas neste trabalho. No Brasil, as Torres de Controle devem registrar todos os *reportes* de WS que ocorram da superfície até 2.000 pés (aproximadamente 600 m) de altura.

Segundo a *Federal Aviation Administration - FAA* (2008), este fenômeno pode ocorrer em altas ou baixas altitudes e nas direções vertical e horizontal. Os 4 tipos mais comuns de WS em baixas altitudes são oriundos de: a) atividade de frentes (quentes ou frias); b) tempestades; c) inversões térmicas e d) obstruções superficiais.

Os fatores causais apontados por Brasil (2016) são: trovoadas, presença de nuvens do tipo *Cumulonimbus*, *Cumulus virga*, sistemas frontais, correntes de jato de baixos níveis, ventos fortes à superfície, brisas marítimas e terrestres, ondas de montanha, linhas de instabilidade e fortes inversões de temperatura, dentre outras.

Outro fenômeno relevante são as microexplosões, que foram descritas em Linden e Simpson (1985) e Sez (1986). Segundo a FAA (2008), estes eventos são associados a tempestades severas e são resultados de grandes massas de ar descendentes que divergem horizontalmente sobre a superfície. Estes ventos podem mudar de direção horizontal em até 180°, atingir velocidades de 100 kt e grandes distâncias - até 16 km (8,6 milhas náuticas) à frente da tempestade. A velocidade da rajada de vento pode aumentar em até 50% entre a superfície e 1.500 ft,

com a maior parcela do aumento ocorrendo nos primeiros 150 ft. As consequências de um evento desses, em uma aproximação para pouso, podem ser catastróficas, tal qual aconteceu no voo Delta 191, em 2 de agosto de 1985, onde 135 pessoas morreram. Segundo um relatório do acidente (Aviation Safety Network, 2019), dentre as possíveis causas do acidente está a falta de informações, procedimentos e treinamentos para evitar ou escapar de WS, além da falta de sistemas de alerta em tempo real sobre a ocorrência deste fenômeno. Isso resultou na decisão da tripulação em se direcionar rumo a um WS severo, causado por uma microexplosão oriunda de uma tempestade próxima à pista de Dallas. A aeronave foi violentamente jogada contra o solo, mesmo com todo o esforço da tripulação em manter o voo (Aviation Safety Network, 2019).

O conceito de microexplosão foi introduzido por Fujita (1980) e geralmente este fenômeno ocorre em uma área muito maior do que das explosões atmosféricas, e seus ventos geralmente atingem intensidades menores. (Mersereau, 2014). O poder deste evento pode exceder as capacidades de subida de aeronaves, não só de modelos de pequeno porte, mas até mesmo em aviões de caças de alto desempenho (FAA, 2008). Além dos riscos devido à intensidade elevada, a microexplosão dificilmente é detectada por sistemas de alerta de WS devido à sua curta duração (Spencer e Tynan, 2015).

As microexplosões são eventos de difícil previsibilidade, devido às suas rápidas evoluções e ocorrências. Segundo o *National Weather Service - NWS* (2011), estes fenômenos geralmente são detectáveis entre 6-12 h antes da ocorrência. Os meteorologistas utilizam diversos parâmetros atmosféricos para tentar prever o potencial deste fenômeno, que geralmente ocorre nos meses de verão: instabilidade atmosférica, alto potencial de ocorrência de chuva dados por índices convectivos (CAPE, Showalter), seguido de ventos fortes nas camadas inferiores.

Os primeiros 500 m (aproximadamente 1640 ft) da atmosfera partindo da superfície são os mais críticos, principalmente para os estágios iniciais e finais das operações de voo por conta da presença de turbulência, WS, mudanças bruscas na direção do vento e formação de nevoeiro. Esses eventos atmosféricos transitórios a baixas altitudes têm grande impacto na segurança de voo nas fases de decolagem, de aproximação final e de pouso, pois são nestas fases que as aeronaves normalmente encontram-se à baixa velocidade e com manobrabilidade comprometida, devido ao fato de os *flaps* estarem estendidos, os *spoilers* armados e trem de pouso baixo (Silva et al., 2016), condições que desfavorecem a aerodinâmica da aeronave, devido à tração e a sustentação estarem prejudicados.

As ocorrências de WS associadas às microexplosões são um dos maiores perigos à atividade aeronáutica, principalmente nas etapas de decolagem e pouso. Como apontado por Fujita (1980), devido à suas pequenas dimensões horizontais, estes fenômenos podem causar uma forte ra-

jada de ventos de proa-a-cauda em combinação com fortes correntes descendentes, até altitudes próximas ao solo, causando fortes tesouras de vento.

Do ponto de vista sinótico, na região Sudeste do Brasil ocorre passagem de sistemas frontais, que podem provocar WS. Algumas horas antes de uma frente fria chegar à região, há uma intensificação de ventos de noroeste, que, com a proximidade do SBGR à Serra da Cantareira, ao entrarem em contato com a mesma adquirem fluxo turbulento, causado por ondas orográficas (Silva, 2016). Em SBGR, esse perfil é influenciado pelo efeito mecânico do relevo, pelo estabelecimento do padrão de circulação local e por sistemas meteorológicos transientes.

Atualmente, há diversos sistemas de detecção de WS instalados tanto em solo, nas proximidades de aeroportos (Cho *et al.*, 2008), como embarcados, que, aliado ao treinamento da tripulação, tem reduzido o número de acidentes. Os modelos numéricos regionais de previsão de tempo, de área limitada, também têm sido empregados para auxiliar na previsão e detecção de WS (Shaw *et al.*, 2008; Villiers e White, 2014; Chan e Hon, 2016).

Este trabalho tem como objetivo abordar a ocorrência de WS no Aeroporto Internacional de São Paulo-SBGR, situado na cidade de Guarulhos, separado em uma parte observacional (análise das condições médias em 18 meses de observações) e de modelagem, com o uso de um modelo atmosférico de mesoescala (WRF) adaptado para as características locais.

2. Material e Métodos

Para a etapa do estudo observacional (a partir de 18 meses de medidas) da ocorrência de WS, foram obtidos, junto à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeronáutica - INFRAERO, os valores medidos pelo equipamento SODAR relativos ao perfil de vento no Aeroporto Internacional de São Paulo, em Guarulhos (SBGR), que possui 2 pistas paralelas, sem operações simultâneas: 09L (27R) e 09R (27L), medindo respectivamente 3.700 e 3.000 m (Brasil, 2015), cada uma equipada com um perfilador de vento em sua cabeceira.

O equipamento SODAR é um perfilador de vento, composto por transdutores piezoelétricos, que usa a reflexão de pulsos acústicos nas não-homogeneidades da atmosfera para estimar a direção e velocidade tridimensionalmente, em intervalos de tempo pré-definidos, os quais foram de 15 minutos no equipamento utilizado neste trabalho. Este tipo de sistema funciona pela emissão de pulsos sonoros, que são espalhados por heterogeneidades de temperatura no ar. A antena recebe em seguida os ecos dos pulsos sonoros, estimando, assim, a altura, intensidade e direção do vento, pelo tempo de retorno e variação de frequência do eco. Este equipamento tem como limitação a sensibilidade a interferências externas como temperatura, umidade/precipitação e ruído externo; este fator pode atenuar o sinal a ponto de acarretar perda total dos dados (Silva, 2016).

Um equipamento do tipo MFAS, composto por 64 elementos de antena (transdutores) e resolução vertical de 10 m (Scintec Ag., 2013) está localizado na cabeceira 27L do SBGR (mostrada na Fig. 1) e os dados foram levantados deste equipamento, durante o período de 01 de janeiro de 2016 a 09 de junho de 2017, para em seguida serem tratados e representados graficamente utilizando o aplicativo APRun, que é um aplicativo de visualização de WS. Maiores detalhes deste software em Scintec Ag. (2013).

Adicionalmente os dados do SODAR foram comparados aos *reportes* de “Avisos de Aeródromo” e METAR/SPECI, extraídos do sistema OPMET/REDEMETS (REDEMETS, 2019), a fim de se confrontar os *reportes* ou indícios de WS e as condições meteorológicas. É importante salientar que o “vento de superfície” reportado no METAR é medido por um anemômetro, localizado a 10 m AGL, com tolerância de ± 1 m da base da torre anemométrica (EMS-1 GR), de acordo com a norma MCA 101-1 do DECEA, de 2015. Segundo Cabral (2006), nas estações meteorológicas de superfície (EMS) existentes em mais de 100 aeródromos brasileiros, são confeccionados e difundidos de hora em hora boletins meteorológicos onde constam as informações reais da área do aeródromo e que servirão de base às operações de pouso e decolagem. São elaborados 2 tipos de boletins: METAR (*METE*orological *Aerodrome Report* - Informe meteorológico regular de aeródromo) e SPECI; sendo o boletim METAR elaborado de hora em hora, enquanto o SPECI é de caráter esporádico, não programado, quando há uma alteração acentuada ou um fenômeno significativo observado, como por exemplo tempestades, nevoeiros ou WS, o(s) qual(is) não estava(m) previsto(s) inicialmente no METAR.

Segundo REDEMETS (2013), para o SBGR deve-se analisar nas cartas de vento, nos níveis FL050 e FL100, a existência de ventos de 20 a 25 kt soprando no través das serras da proximidade. O setor menos propenso ao WS é o que estiver ao lado contrário do vento da serra. A proximidade

Segundo REDEMETS (2013), para o SBGR deve-se analisar nas cartas de vento, nos níveis FL050 e FL100, a existência de ventos de 20 a 25 kt soprando no través das serras da proximidade. O setor menos propenso ao WS é o que estiver ao lado contrário do vento da serra. A proxi-



Figura 1 - Vista Aérea do Aeroporto Internacional de São Paulo em Guarulhos (SBGR), com a localização do instrumento SODAR.

midade da Serra da Cantareira (setor norte) apresenta fortes influências sobre os ventos, quando o escoamento é orientado no sentido da serra para o aeroporto (Silva, 2016). Acompanhando as informações do SODAR, rotineiramente, observa-se que ele detecta com relativa antecedência a modificação do vento em 1000 ft (da direção de NE para NW), levando-se em conta que o vento se altera primeiramente em altitude e, logo após, na superfície, em virtude do atrito (fricção ou rugosidade).

As simulações numéricas com o modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF-ARW), versão 3.9.1.1, foram feitas no Laboratório Integrado de Micrometeorologia e Modelagem Atmosférica (LIMMA), da Universidade Estadual do Ceará (UECE), utilizando um cluster com 8 computadores interligados, cada um com 16 processadores em paralelo.

Durante as análises observacionais, foram identificados 5 casos de WS extremos. Foram realizadas simulações para todos estes casos, entretanto, apenas um deles (29 de janeiro de 2017) foi escolhido para ser mostrado neste artigo, por apresentar os melhores resultados. Para reproduzir as ocorrências de WS para os dias nos quais o SODAR registrou intensidade “extrema”, as simulações iniciaram-se 24 h antes (sempre às 00 UTC), desprezando as primeiras 12 h, para o tempo de acomodação do modelo (*spin up time*). Os resultados das simulações foram comparados aos dados de SODAR, ambos com a mesma frequência temporal, ou seja, em intervalos de 15 min.

Foram executados 04 experimentos para cada caso observado de WS extremo, para se avaliar a destreza do modelo com relação à:

- I. variação da resolução vertical (níveis) do modelo;
- II. uso de alta-resolução de dados de topografia e uso e ocupação do solo.

Iniciou-se sempre com as condições padrão (*default*) no modelo, ou seja, a altura dos níveis verticais sendo determinadas pelo próprio modelo; os dados de entrada (estáticos) de topografia baseadas no *Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010* - Dados Multi-resolução de Terrenos (GMTED2010), com resolução espacial de aprox. 925 m (30"); e os dados de uso e ocupação do solo (*land use*) baseados no *IGBP-Modified* (IGBP - *International Geosphere-Biosphere Program*) MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), também com resolução de aprox. 925 m (30").

As simulações com as condições *default* foram comparadas com outras que utilizavam níveis verticais com alturas previamente determinadas, com uma maior resolução em baixos níveis e escolha do primeiro nível abaixo de 12 m de altura (Shin *et al.*, 2012); dados de topografia com resolução espacial de 90 m, baseados na *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - NASA, e o uso e ocupação do solo no mesmo arquivo do MODIS, só que com resolução espacial de aprox. 463 m (15"). Os experimentos numéricos realizados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Experimentos (simulações) do modelo WRF para avaliação da melhor configuração em relação aos níveis verticais e uso e ocupação do solo (*land use*).

Experimento	Características
Exp1	Níveis verticais: <i>default</i> Topografia: <i>default</i> Uso e ocupação do solo: <i>default</i>
Exp2	Níveis verticais: <i>default</i> Topografia: <i>SRTM (90 m)</i> Uso e ocupação do solo: <i>MODIS (15")</i>
Exp3	Níveis verticais: <i>Pré-determinados</i> Topografia: <i>default</i> Uso e ocupação do solo: <i>default</i>
Exp4	Níveis verticais: <i>Pré-determinados</i> Topografia: <i>SRTM (90 m)</i> Uso e ocupação do solo: <i>MODIS (15")</i>

Todas as simulações possuem 45 níveis verticais no total. Os dados do SODAR são registrados a partir de 30 m de altura (aprox. 100 ft), em intervalos de 10 m (aprox. 30 ft), até o topo do alcance do instrumento, que é de aproximadamente 520 m (1700 ft).

Todas as simulações utilizaram dados atmosféricos de reanálise do ERA-*Interim*, produzido pelo Centro Europeu para Previsões de Tempo de Médio Alcance (em inglês *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF), como condições iniciais e de contorno, descritas em detalhe em Dee *et al.* (2011).

Foram utilizados três domínios “aninhados”: **d01**, com 151x121 pontos de grade com resolução espacial de 16,2 km; **d02**, com 121x121 pontos e resolução de 5,2 km; e **d03**, com 151x151 pontos e resolução de 1,8 km, centralizados nas proximidades da cabeceira 09R de SBGR, na latitude 23,48°S e longitude 46,48°W (ver Fig. 2). A

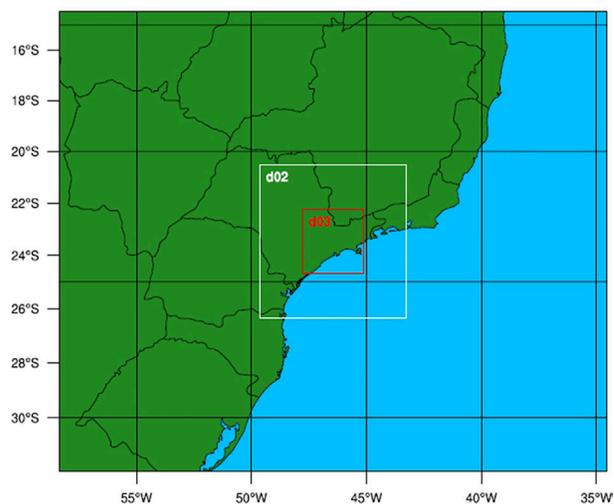


Figura 2 - Domínio das 3 grades utilizadas, centralizadas em SBGR.

configuração física foi baseada no conjunto tropical de parametrizações (*tropical suite*), uma funcionalidade do modelo que contém os esquemas que melhor se ajustam às latitudes tropicais (Ribeiro, 2019). Basicamente, o conjunto *tropical suite* consiste das seguintes escolhas de esquemas físicos (com o respectivo número correspondente no arquivo *namelist.input*): *mp_physics* = WSM 6-class graupel scheme (6); *cu_physics* = newer Tiedtke scheme (16); *ra_lw_physics* = RRTMG scheme (4); *ra_sw_physics* = RRTMG scheme (4); *bl_pbl_physics* = YSU scheme (1); *sf_sfclay_physics* = Old MM5 scheme (91); e *sf_surface_physics* = Unified Noah land-surface model (2). A parametrização de *Cumulus* foi desativada no domínio **d03**.

Para se avaliar a sensibilidade do modelo na representação dos perfis de ventos próximos ao solo, foram utilizadas métricas usuais de Meteorologia, a saber: o Viés médio (BIAS); a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM ou RMSE, em inglês); e o Índice de Correlação de Pearson (*R*). As fórmulas matemáticas destes parâmetros estão descritas em Ribeiro (2019). Estas métricas foram aplicadas para a velocidade do vento, *wspd*, componentes zonal, *u*, e meridional, *v*, do vento.

Além destes, procurou-se analisar o perfil vertical do vento utilizando-se da abordagem proposta por Draxl et al. (2014) para o coeficiente de cisalhamento, α , e o Erro do Perfil do Vento (WPE, do inglês *Wind Profile Error*). O WPE não é nada mais que a média do REQM para a velocidade do vento. O coeficiente de cisalhamento, α , é definido como na Eq. (1),

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{u_2}{u_1}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}, \quad (1)$$

onde u_2 e u_1 são as velocidades do vento nos níveis de altura z_2 e z_1 , respectivamente. Se a velocidade do nível superior for maior que a do inferior, $\alpha > 0$; analogamente, quando a velocidade do nível inferior for maior que a do superior, $\alpha < 0$. Valores encontrados para α na literatura, para uma atmosfera estável estão em torno de 0,2 (Draxl et al., 2014; Cardoso, 2016).

Finalmente, calculou-se a variação vertical (gradiente) da velocidade do vento em kt/100 ft, calculando a variação de ambas as componentes (u e v) pela variação de altura (z).

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados observacionais

A partir dos dados medidos pelo SODAR, foi constatado um grande número (da ordem de milhares) de registros de WS, em sua grande maioria (98,94%) de intensidade moderada (Tabela 2). As ocorrências do tipo leve foram descartadas, pois seus riscos à operação são

menores. Por outro lado, a Tabela 3 mostra a quantidade de dias em que WS foram registrados pelo SODAR e pelos pilotos, comparando-se os registros de ambas as fontes de dados.

A diferença entre os totais das Tabelas 2 e 3 deve-se ao fato que, em uma determinada hora pode haver registro de WS a várias altitudes pelo SODAR para o mesmo dia e hora. Para efeito de comparação, foi levada em conta a quantidade de dias com ocorrências/reportes (Tabela 3), e não simplesmente a quantidade de registros, para que o resultado fosse mais preciso.

Em relação à distribuição sazonal de dias com ocorrências de WS, a Fig. 3 mostra os resultados sumarizados, comparando as quantidades de dias em que houve registros tanto do SODAR como dos reportes dos pilotos. Os resultados obtidos mostram uma maior quantidade de registros de WS do SODAR no mês de agosto de 2016 (29 casos - 10,32%), enquanto a maior quantidade de reportes dos pilotos ocorreu no mês de outubro de 2016 (19 casos - 15,45%) e a época em que os números de dias com ocorrências mais coincidiram foram nos meses de janeiro e março de 2017 (13 casos - 9,77%).

Em relação à severidade dos WS, a Fig. 4 relaciona os registros do SODAR aos meses do ano. Percebe-se que a maioria dos casos de WS extremo (10 casos - 83,33%) foi registrada no mês de janeiro, enquanto a maioria dos severos foi registrada no mês de junho (70 casos - 27,56%), mês em que também foram registrados 2.962 casos - 11,84% da categoria moderado, valor superado apenas pelo mês de março (2.982 casos - 11,92%) e abril, que apresentou 4.658 registros (18,63%) deste tipo de WS.

Outras classificações necessárias para um entendimento aprofundado sobre este fenômeno referem-se ao período do dia relacionado à WS, mostrado na Fig. 5 e, de acordo com a altitude e intensidade deste fenômeno, mostrado na Fig. 6.

No primeiro caso tem-se predominância de casos extremos e severos durante o período da madrugada (0300

Tabela 2 - Número de WS registrados pelo SODAR em SBGR.

Categoria	Quantidade	%
Moderada	25.008	98,94%
Severa	254	1,00%
Extrema	14	0,06%
Total	25.276	100%

Tabela 3 - Comparativo das ocorrências de WS registradas no SODAR x Reportes dos pilotos.

		Reportes dos Pilotos	
		SIM	NÃO
SODAR	SIM	133	291
	NÃO	33	-

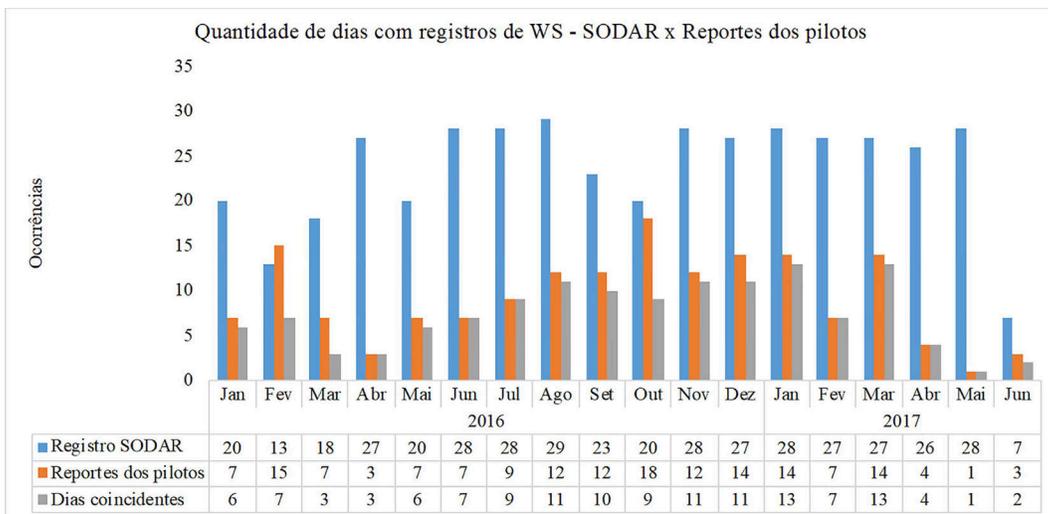


Figura 3 - Distribuição Mensal de registros de WS- SODAR x Reportes dos pilotos.

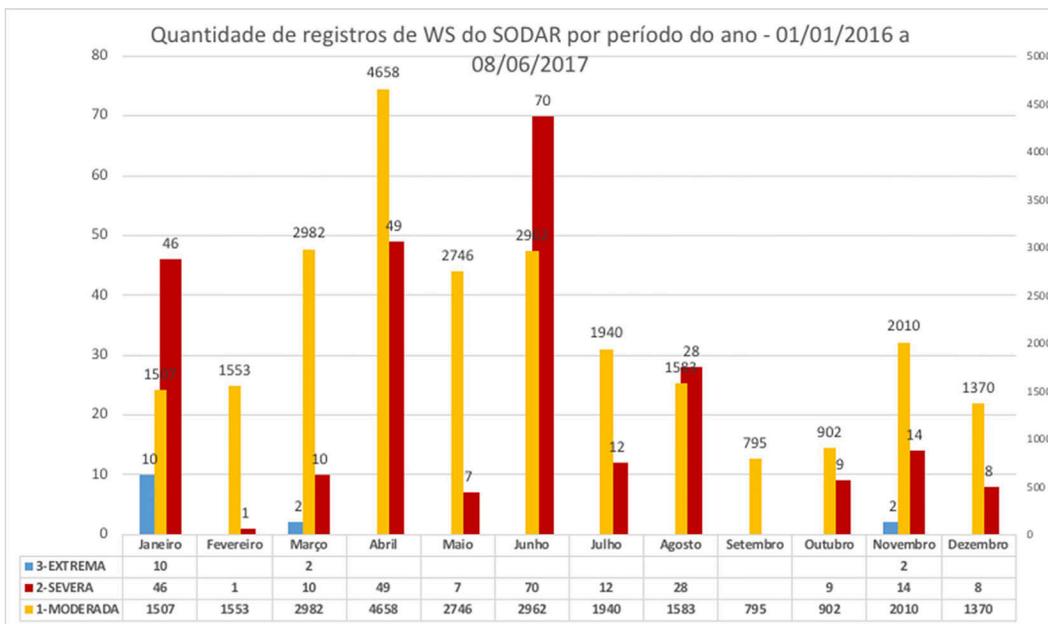


Figura 4 - Quantidade de registros de WS do SODAR - por período do ano. Foi aplicado um fator de escala para as classificações de “Severa” e “Extrema” de forma a facilitar a visualização destes registros.

UTC a 0859 UTC) - 6 e 136 casos (42,86% e 53,54%), respectivamente, seguidos da noite (2100 UTC e 0259 UTC) - 6 e 47 casos (42,86% e 18,50%), respectivamente, da tarde (1500 UTC a 2059 UTC) - 1 e 44 casos (7,14% e 17,32%), respectivamente, e pela manhã (0900 UTC a 1459 UTC) - 1 e 27 casos (7,14% e 10,63%), respectivamente. A maior quantidade de casos moderados ocorreu no período da manhã - 7.312 (29,24%), valor bem próximo ao da madrugada - 7.040 casos (28,15%), seguidos pela tarde - 5.911 casos (23,63%) e pela noite - 4.745 casos (18,97%). Em relação à severidade de WS e altitude,

representada na Fig. 6, a maioria dos casos da categoria extremos e severos ocorreu entre 0-100 ft (11 e 100 casos - 78,57% e 39,37%, respectivamente), enquanto as ocorrências moderadas predominaram nas altitudes entre 100-200 ft (3563 registros - 14,24%).

Em relação aos reportes dos pilotos, os dados obtidos classificam as ocorrências em severo, moderado, moderado/severo e outros. Como o ato de reportar o WS ao controle de tráfego aéreo não é automatizado, é possível que, em muitos casos, os pilotos não tenham meios de medir exatamente a intensidade antes de comunicar aos

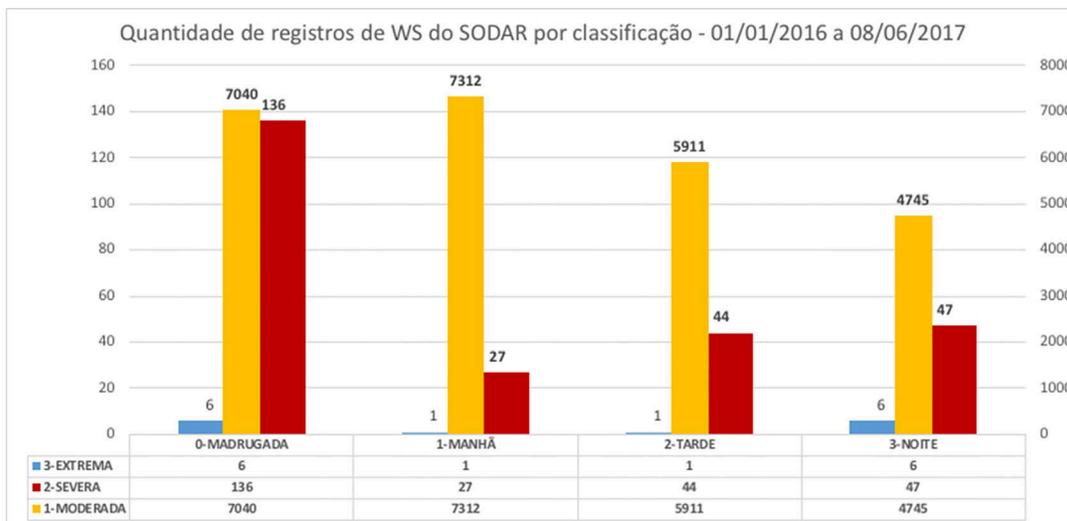


Figura 5 - Quantidade de registros de WS do SODAR por classificação. Foi aplicado um fator de escala para as classificações de “Severa” e “Extrema” de forma a facilitar a visualização destes registros.

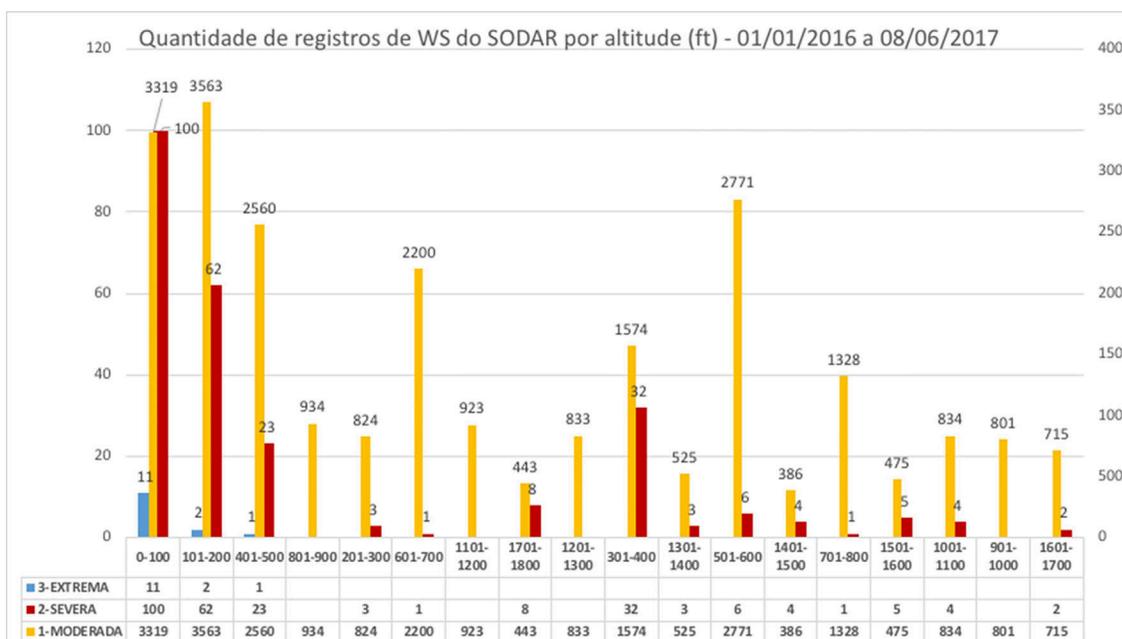


Figura 6 - Quantidade de registros de WS do SODAR por faixa de altitude (dada em pés). Foi aplicado um fator de escala para as classificações de “Severa” e “Extrema” de forma a facilitar a visualização destes registros.

controladores de voo; desta forma eles tenderiam a informar a dimensão deste fenômeno baseado em suas experiências profissionais. (Ribeiro, 2019),

Para o período estudado foram registrados 294 *reportes* de WS para os aeródromos da região (Guarulhos; São Paulo (Congonhas e Campo de Marte); Campinas; Bragança Paulista; Ribeirão Preto; Jundiaí; Uberlândia; e Uberaba), sendo 153 casos para SBGR (52,04%). Destes, 113 aconteceram de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2016, e 40 aconteceram de 01 de janeiro a 09 de junho de

2017. No ano de 2016 em SBGR houve prevalência de *reportes* no mês de dezembro (19 casos - 16,81%), seguido por julho - 13 casos - 11,50%, e fevereiro - 11 casos - 9,73%. Em 2017, até o fim do período estudado, neste mesmo aeródromo houve um maior número de relatos no mês de junho - 13 casos (32,50%), seguido por janeiro - 13 casos (30,00%) e março - 5 casos (12,50%). Estas informações foram extraídas de Ribeiro (2019). A Fig. 7 mostra a quantidade de *reportes* de pilotos de acordo com o mês do ano.

Apesar da maioria das ocorrências serem de intensidade moderada, as ocorrências de maior risco para a aviação são os WS extremos. Foram identificados e analisados 5 casos de ocorrência de WS extremos, ocorridos principalmente no período do verão (novembro a março), nos anos de 2016 e 2017. Estas análises estão detalhadas em Ribeiro *et al.* (2017) e Ribeiro (2019). Neste artigo, será apresentado apenas um estudo de caso (dia 29 de janeiro de 2017), que também foi objeto da simulação numérica, como descrito na Seção 2.

Na Fig. 8 tem-se a intensidade da WS observada. No início do período (0515 UTC) há registros de WS de intensidade leve (valor máximo de 2,25 kt/100 ft a 131,2 ft). No período destacado, a partir de 0600 UTC, a intensidade do WS passou da categoria leve (4,15 kt/100 ft a 98 ft) para moderado (valores de 7,23 kt/100 ft a 98 ft, às 0615 UTC). Às 0630 UTC foram registradas três ocorrências de WS do tipo severa. Houve variações de valores, de 2,55 kt/100 ft a 393 ft (categoria leve), até atingir a categoria severa, com a diminuição de altitude - 9,12 kt/100 ft a 164 ft; 10,43 kt/100 ft a 131 ft, até atingir o auge para este momento - 11,14 kt/100 ft a 98 ft. Nos quinze minutos seguintes foram registradas as maiores intensidades do WS com o decréscimo da altitude. Aos 393 ft, o equipamento SODAR indicou variações de WS de 3,67 kt/100 ft (categoria leve); 5,92 kt/100 ft a 295 ft (categoria moderada); 9,07 kt/100 ft a 197 ft (categoria severa), até atingir o pico de intensidade de 12,15 kt/100 ft a 98 ft (categoria extrema). Com o passar do tempo o fenômeno foi perdendo força, atingindo picos de intensidade moderada, até enfraquecer

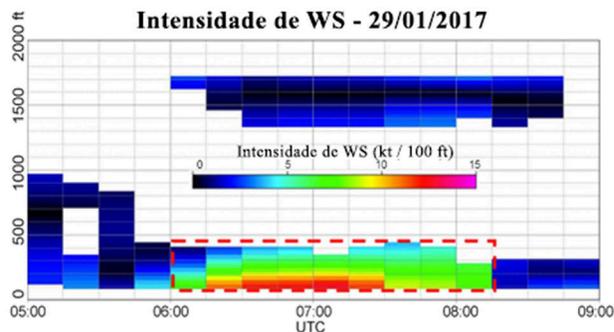


Figura 8 - Intensidade de WS em 29/01/2017, de 0500 UTC a 0900 UTC. Destaque para o período entre 0600 UTC e 0815 UTC, que será visualizado com vetores na Fig. 10 (b).

ao final do período (0900 UTC), sendo valor máximo registrado da categoria leve.

Em relação à direção do WS, ilustrada na Fig. 9, para o início do período estudado (0515 UTC) tem-se variações do fenômeno, que foi registrado inicialmente no sentido Oeste-Noroeste (284 a 279°) para o intervalo de 689 a 951 ft, tornando-se de Leste-Nordeste (64 a 87°) na faixa entre 131 e 656 ft. Para o período de maior intensidade, destacado em verde, às 0600 UTC o fenômeno foi registrado com variações na direção entre Oeste-Sudoeste (255° a 98 ft) e Sudeste (135° a 426 ft). Este comportamento permaneceu semelhante a baixas altitudes - menos de 400 ft - até o fim do período destacado, inclusive para a hora onde foram registradas as maiores intensidades de WS (0645 UTC). As maiores variações de direção para este momento ocorreram entre 1345 ft - de Leste-Nordeste

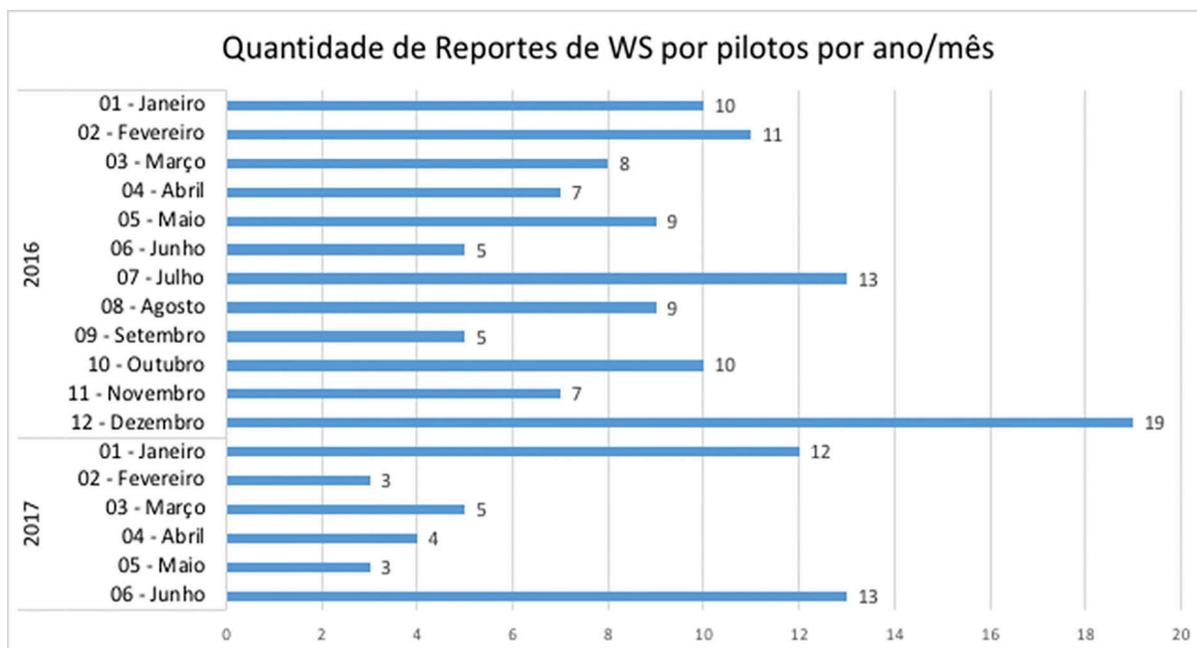


Figura 7 - Reportes de WS por pilotos por ano/mês.

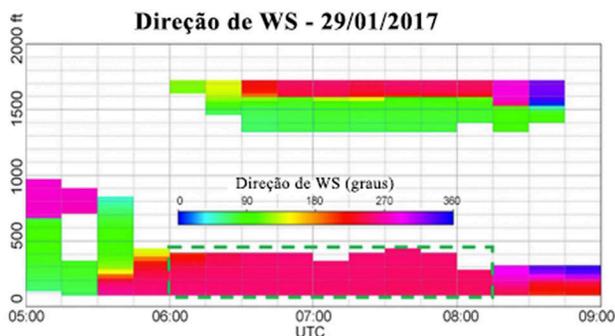


Figura 9 - Direção de WS em 29/01/2017, de 0500 UTC e 0900 UTC. Destaque para o período entre 0600 UTC e 0815 UTC, que será visualizado com vetores na Fig. 10 (b).

(66°) para Sudoeste (223°) a 1706 ft. Ao final do período tem-se maiores mudanças, como as ocorridas às 0845 UTC, onde há oscilações de 333° (Norte-Noroeste) a 295 ft até 94° (Leste-Sudeste) a 1345 ft.

Em relação ao vetor velocidade do vento, representado na Fig. 10, no início do período (0515 UTC) a baixas altitudes (até 328 ft) tem-se a predominância de ventos de baixa intensidade (entre 2,82 e 3,58 kt na direção Leste-Sudeste), com um aumento na faixa de altitudes entre 720 e 950 ft, para valores entre 16,72 e 20,16 kt na direção Leste. Com a intensificação do WS, às 0600 UTC, foi registrada variação de velocidade do vento, de 1,98 kt na direção Leste-Sudeste (122°) a 98 ft até 18,80 kt na direção Oeste-Sudoeste (249°) a 394 ft de altitude. No momento em que foi registrada a ocorrência de WS de intensidade extrema (0645 UTC) há variações do vento de 1,09 kt na direção Sul-Sudeste (163°) a 98 ft de altitude até o pico de 21,98 kt na direção Oeste-Sudoeste (252°) a 252 ft de altitude. Este valor continuou a valores e direção semelhantes até 853 ft e voltou a cair acima de 1250 ft. Nos minutos seguintes o fenômeno continuou intenso; com isso foram representadas no vetor velocidade do vento grandes mudanças de velocidade e direção. A 98 ft foi registrado 1,07 kt de intensidade de vento na direção Leste-Sudeste (127°). Este valor a 853 ft subiu para 25,7 kt na direção Oeste-Noroeste (284°). Com a perda de intensidade do fenômeno, a velocidade do vento também caiu. Às 0800 UTC o valor máximo para este parâmetro foi de 1,67 kt na direção Leste-Nordeste (62°) a 262 ft,

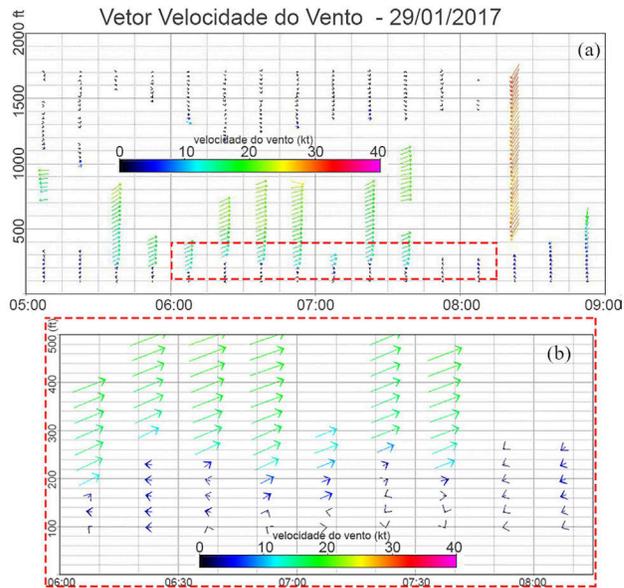


Figura 10 - (a) Vetor velocidade do vento do dia 29/01/2017, de 0500 UTC a 0900 UTC; (b) Destaque para o período entre 0600 UTC e 0815 UTC.

conforme o destaque na Fig. 10 (b). Após o período destacado houve uma intensificação da velocidade do vento - às 0830 UTC variou entre 1 e 5,21 kt na direção Leste-Nordeste para as altitudes entre 98 e 295 ft e entre 26,46 a 31,16 kt na direção Norte-Nordeste para as altitudes entre 459 e 1607 ft. Este comportamento desapareceu nos momentos seguintes, sendo registrados vetores de baixa intensidade até o fim do período (0500 UTC).

Em relação ao METAR, mostrado na Tabela 4, para a data e hora deste caso estudado, em todo o período a visibilidade horizontal é maior que 10 km. Em relação à nebulosidade, às 0500 UTC havia poucas nuvens a 1.000 ft e céu nublado a 3.000 ft. O vento registrado foi de 6 kt na direção leste-sudeste (120°). Para o período onde foram registrados os maiores valores de WS (0600 a 0815 UTC), o céu estava nublado, entre 1.000 e 5.000 ft e o vento oscilou entre 0 e 3 kt na direção leste-sudeste (120°). Não há reportes de WS por pilotos durante o período.

A imagem do satélite GOES-13 (Fig. 11a) mostra a presença de formações de baixa temperatura sobre SBGR, que foi confirmada por boletim técnico (Brasil, 2017a), e

Tabela 4 - METAR/SPECI de SBGR do dia 29/01/2017, de 0500 UTC a 0900 UTC (REDEMET, 2019).

Data - Hora	Mensagem
29/01/2017 - 0500 UTC	METAR SBGR 290500Z 12006KT 9999 FEW010 BKN030 22/21 Q1021=
29/01/2017 - 0600 UTC	METAR SBGR 290600Z 12003KT 9999 BKN010 21/21 Q1020=
29/01/2017 - 0700 UTC	METAR SBGR 290700Z 12003KT 9999 SCT010 BKN050 21/21 Q1020=
29/01/2017 - 0800 UTC	METAR SBGR 290800Z 00000KT 9999 SCT010 BKN050 20/20 Q1021=
29/01/2017 - 0900 UTC	METAR SBGR 290900Z 09002KT 9999 FEW010 BKN080 21/20 Q1021=

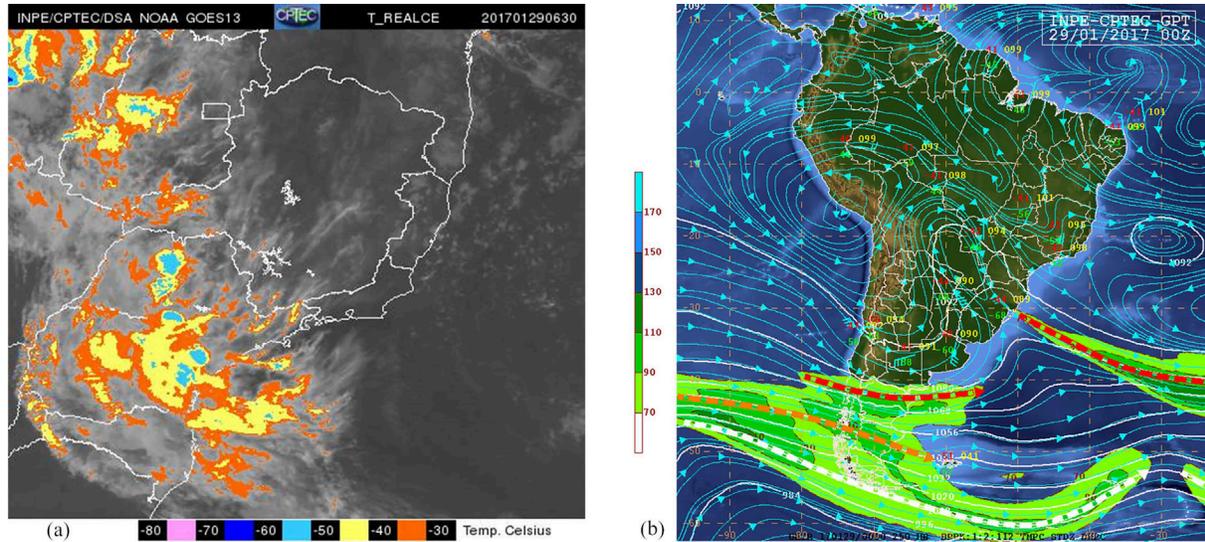


Figura 11 - (a) Imagem do satélite GOES-13 do dia 29/01/2017 às 0630 UTC; e (b) carta sinótica para o período. Fonte: Brasil (2017a).

carta sinótica de 250 hPa (Fig. 11b), que cita a presença de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a região, causando instabilidade e sendo prevista a ocorrência de pancadas de chuva ao longo do dia, com muitas descargas elétricas, ventos fortes e até granizo. Conforme registrado na seção de “casos significativos no mês de janeiro de 2017” (Brasil, 2017b), houve um temporal no estado de São Paulo, que ocorreu da noite do dia 28 para a madrugada do dia 29 de janeiro de 2017, com registro de árvores derrubadas, casas destelhadas e deslizamentos de terra.

3.2. Análise das simulações com o WRF

As análises estatísticas de comparação, definidas pelas métricas tradicionais de viés, erro médio quadrático

(REQM) e de coeficiente de correlação (R) das saídas do modelo WRF com as observações do SODAR, foram realizadas para os resultados dos 4 experimentos para as variáveis α , $wspd$, u e v , e estão descritas a seguir.

3.2.1. Séries temporais das variáveis α , $wspd$, u e v

A séries temporais ilustradas nas Figs. 12-15 mostram respectivamente uma comparação dos parâmetros α , $wspd$, u e v , com os valores medidos pelo SODAR (pontos pretos) e os 4 experimentos (linhas laranja, cinza, amarelo e azul, respectivamente Exp1, Exp2, Exp3 e Exp4), separados por níveis de altura, desde 0015 UTC do dia 28 de janeiro de 2017 até as 2315 UTC do dia 29 de janeiro de 2017. As linhas pontilhadas mostram os períodos dos dias: a partir de 0300 UTC representa-se a madrugada, às 1100

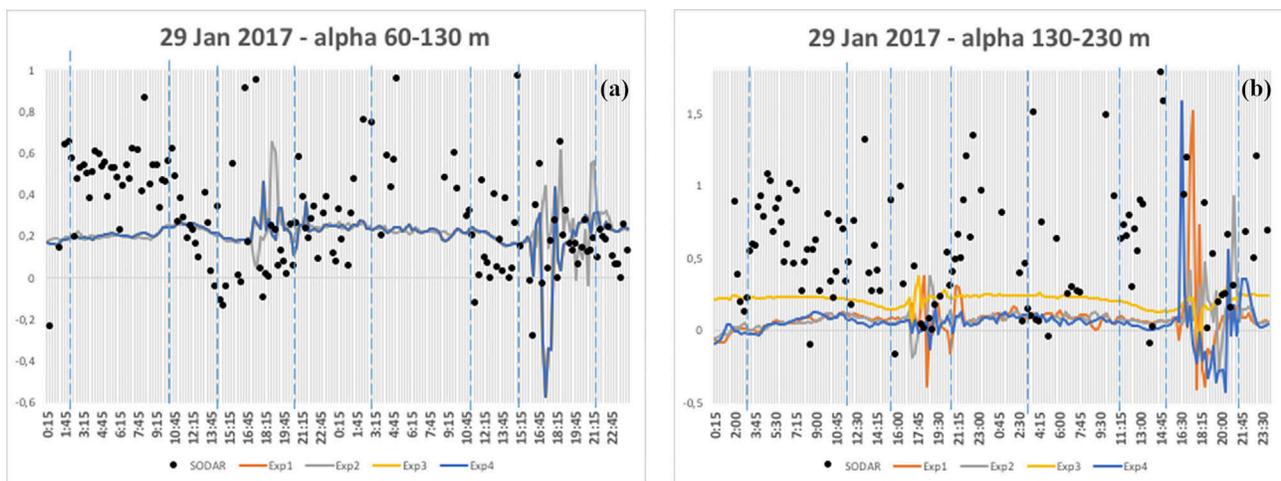


Figura 12 - Séries temporais da variável α calculada conforme a Eq. (1) entre: (a) os níveis 1-2 (aproximadamente 60 e 130 m de altura, respectivamente); e (b) os níveis 2-3 (aproximadamente 130 e 230 m de altura, respectivamente), para o dia 29 janeiro de 2017, em horário UTC.

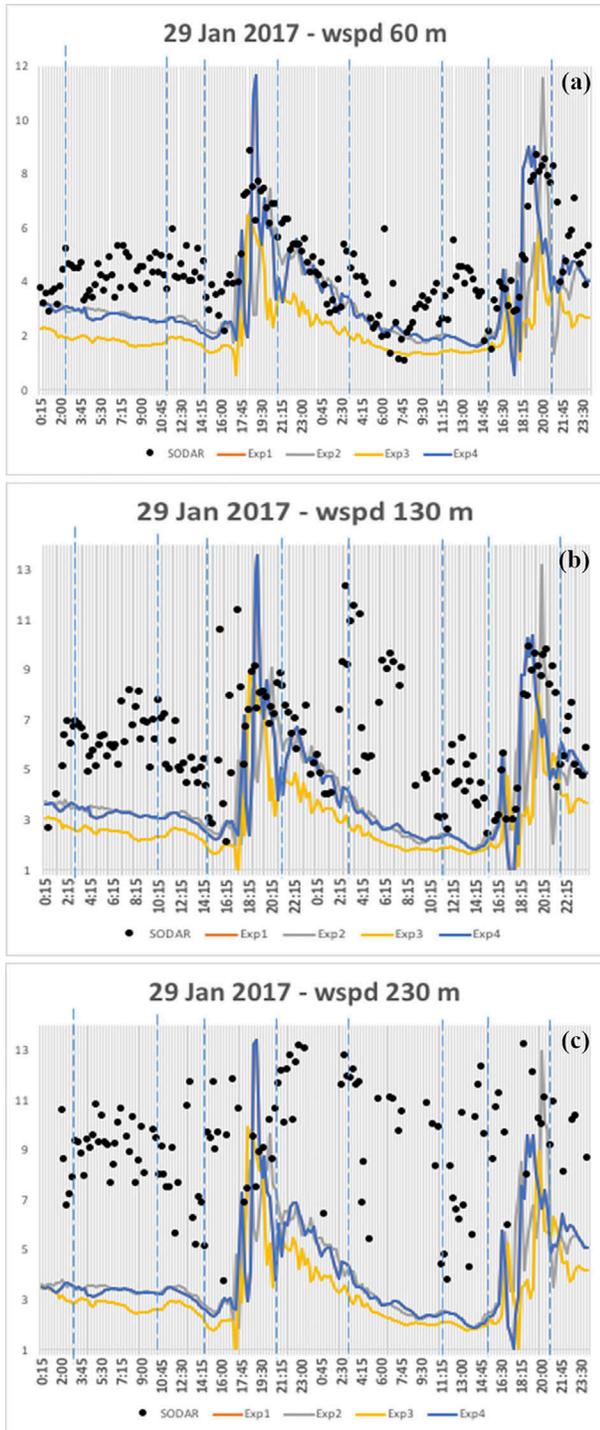


Figura 13 - Séries temporais da variável *wspd*, nos níveis 1 (a), 2 (b) e 3 (c), com aproximadamente 60 m, 130 m e 230 m de altura, respectivamente, para o dia 29 janeiro de 2017, em horário UTC.

UTC tem-se a manhã, a partir das 1500 UTC configura-se a tarde e, finalmente, às 2100 UTC, é representada a noite.

Destaca-se a transição de ventos calmos pela manhã para uma amplitude significativa dos valores dos experimentos para o período da tarde. Neste período, através de

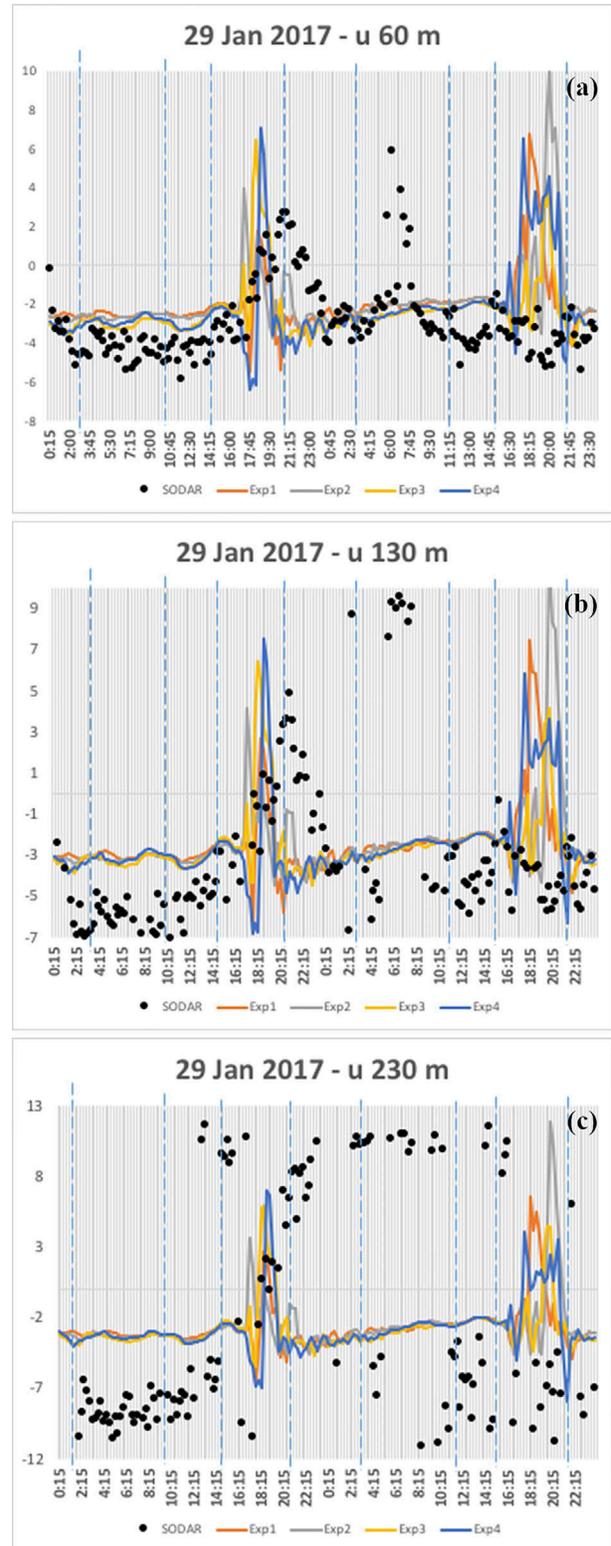


Figura 14 - Séries temporais da variável *u*, nos níveis 1 (a), 2 (b) e 3 (c), com aproximadamente 60 m, 130 m e 230 m de altura, respectivamente, para os dias 28-29 de janeiro de 2017, em horário UTC.

uma análise visual, foi registrada uma correlação maior entre o SODAR e WRF, ou seja, quando os valores obser-

vacacionais (SODAR) apresentavam uma tendência de crescimento ou de decaimento, os dados de modelagem

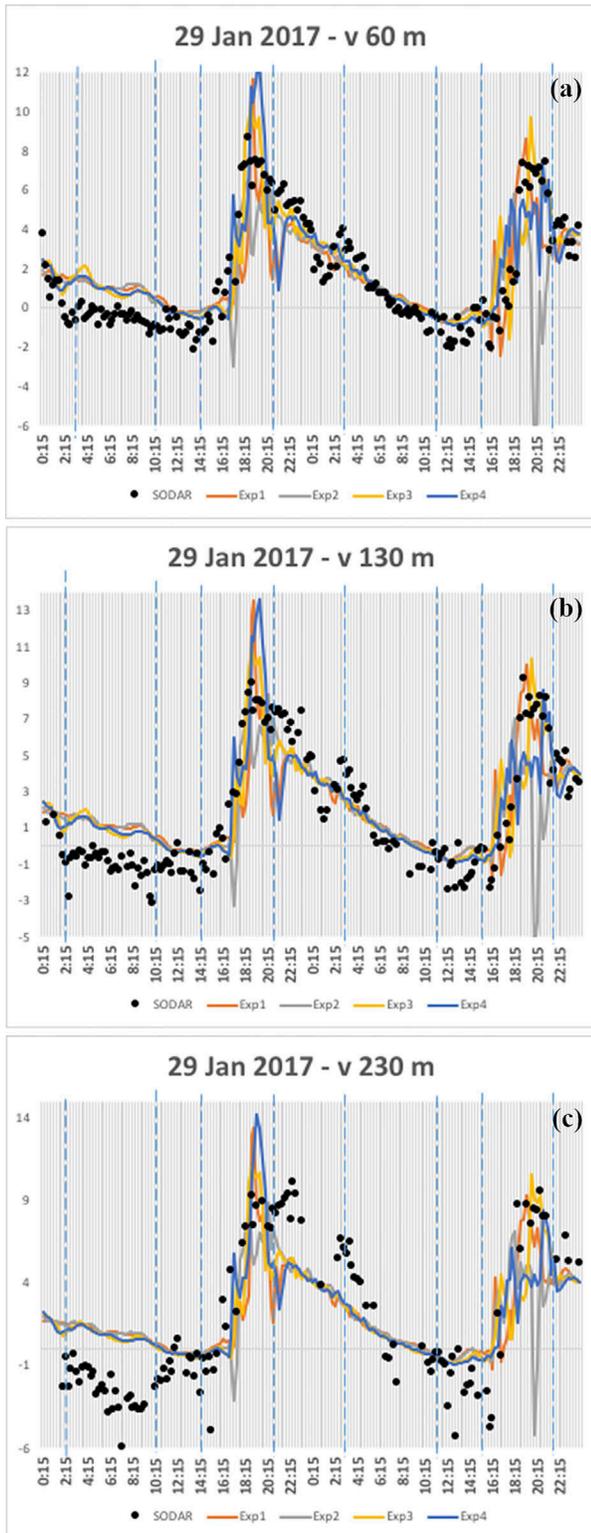


Figura 15 - Séries temporais da variável v , nos níveis 1 (a), 2 (b) e 3 (c), com aproximadamente 60 m, 130 m e 230 m de altura, respectivamente, para os dias 28-29 de janeiro de 2017, em horário UTC.

(WRF) seguiam este comportamento. Esse fato também foi notado por [Cardoso \(2016\)](#), sendo devido a ventos mais intensos.

Em relação à altura, com o aumento dos níveis, tem-se uma correlação menor entre os valores observados e medidos. Este comportamento foi semelhante para os parâmetros α , $wspd$, u e v , conforme as Figs. 12-15.

A [Tabela 5](#) mostra os resultados obtidos das análises estatísticas nos quatro experimentos para a variável velocidade do vento, $wspd$, sendo as componentes do vento apresentadas nas [Tabelas 6](#) (componente zonal u) e [Tabela 7](#) (componente meridional v). A [Tabela 8](#) mostra os resultados para α .

Os testes estatísticos aplicados nos experimentos para a velocidade do vento, $wspd$, revelaram resultados de magnitude semelhante uns dos outros, com exceção do viés no nível 1, ou seja, a aproximadamente 60 m (98 ft) de altura, em que o Exp3 e o Exp4 apresentaram um viés estatístico de aproximadamente zero. À medida que os níveis verticais analisados são mais altos, as métricas estatísticas diminuem de uma maneira geral, como por exemplo com o coeficiente de correlação no nível 3, que chega a algo em torno de 0,2, considerada desprezível.

Tabela 5 - Resultados das análises estatísticas realizados em cada experimento nos três níveis de altura destacados na [Tabela 2](#), para a variável velocidade do vento, $wspd$.

Teste em $wspd$ (Nível de altura)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp4
Viés (nível 1)	-0,4	-0,4	0,1	0,0
REQM (nível 1)	1,6	1,6	1,7	1,7
R (nível 1)	0,6	0,6	0,6	0,6
Viés (nível 2)	-1,0	-1,0	-0,9	-1,0
REQM (nível 2)	2,5	2,5	2,5	2,5
R (nível 2)	0,5	0,5	0,4	0,4
Viés (nível 3)	-3,1	-3,1	-3,0	-3,1
REQM (nível 3)	4,5	4,4	4,4	4,5
R (nível 3)	0,2	0,2	0,2	0,2

Tabela 6 - Resultados das análises estatísticas realizados em cada experimento nos três níveis de altura destacados na [Tabela 2](#), para a variável componente zonal do vento, u .

Teste em u (Nível de altura)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp4
Viés (nível 1)	0,3	0,3	0,1	0,0
REQM (nível 1)	2,1	2,1	2,2	2,2
R (nível 1)	0,5	0,5	0,5	0,5
Viés (nível 2)	0,0	0,1	-0,1	-0,1
REQM (nível 2)	3,5	3,5	3,5	3,5
R (nível 2)	0,4	0,4	0,4	0,4
Viés (nível 3)	-0,4	-0,3	-0,5	-0,6
REQM (nível 3)	5,5	5,5	5,5	5,5
R (nível 3)	0,5	0,4	0,5	0,5

Tabela 7 - Resultados das análises estatísticas realizados em cada experimento nos três níveis de altura destacados na Tabela 2, para a variável componente meridional do vento, v .

Teste em v (Nível de altura)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp4
Viés (nível 1)	0,0	0,0	0,2	0,2
REQM (nível 1)	1,8	1,9	1,8	1,9
R (nível 1)	0,7	0,7	0,8	0,7
Viés (nível 2)	0,1	0,1	0,1	0,0
REQM (nível 2)	2,0	2,2	2,0	2,1
R (nível 2)	0,8	0,7	0,8	0,8
Viés (nível 3)	0,1	0,1	0,1	0,0
REQM (nível 3)	2,8	2,9	2,8	2,9
R (nível 3)	0,8	0,7	0,8	0,7

Da mesma forma que ocorreu com a $wspd$, a componente zonal do vento, u , apresentou resultados de magnitude semelhante contra dados observacionais para todos os testes, ressaltando-se o mesmo comportamento do viés estatístico do nível 1 para os Exp3 e Exp4, que foram também bem próximos de zero. Vale ressaltar que o viés no nível 2 também foi próximo a zero nos quatro experimentos. A diminuição do ajuste dos resultados à medida que se aumenta a altura (níveis mais altos), não foi observada para u , que apresentou correlações em torno de 0,4 a 0,5, considerada fraca, para todos os três níveis.

Em relação à componente meridional do vento, v , os resultados das análises estatísticas para os quatro experimentos também foram muito próximos entre si. Vale destacar o viés em todos os níveis, todos muito próximos de zero, ou seja, o modelo conseguiu reproduzir bem a intensidade de v , o que é corroborado com as correlações, sempre acima de 0,7, que é considerada uma correlação forte. Por outro lado, os erros quadráticos aumentam à medida que se aumenta os níveis de altura.

Esta boa representação da componente meridional do vento, v , já tinha sido observada na Fig. 15. Das quatro variáveis analisadas, ela foi a que apresentou visualmente melhor aderência aos dados do SODAR. Isto pode estar relacionado ao fato de que v é a variável que pode estar sendo mais influenciada pelos efeitos locais, como a proximidade do litoral (circulação de brisa marítima-terrestre) e a topografia (Serra da Cantareira ao norte).

Os valores médios de α também estão muito próximos entre si nos experimentos, porém, distantes dos valores encontrados no SODAR. Esse comportamento já havia sido observado por Storm *et al.* (2009) e Draxl *et al.* (2014), que atribuíram isso a alguns esquemas numéricos de parametrizações da camada limite planetária, que provocam uma “mistura turbulenta de momentum excessiva”, resultando na redução do cisalhamento vertical do vento, principalmente durante à noite.

De uma maneira geral, não é possível, a partir das métricas estatísticas aplicadas, inferir qual a melhor configuração do WRF para simular o WS. Portanto, utilizou-se

Tabela 8 - Valores médios de α , calculados entre os níveis 1 e 2 e entre os níveis 2 e 3, destacados na Tabela 2, com os resultados para o WPE obtidos nos quatro experimentos.

Parâmetro (Níveis)	Exp1	Exp2	Exp3	Exp4	SODAR
α (nível 2/nível 1)	0,2	0,2	0,3	0,1	0,4
α (nível 3/nível 2)	0,1	0,1	0,2	0,1	0,7
WPE (níveis 1, 2 e 3)	2,9	2,9	2,9	2,9	-

o gradiente vertical da velocidade do vento em relação à altura, com valores em kt/100 ft para todos os experimentos. Observou-se nos experimentos Exp1 e Exp2 que, em nenhum deles, o valor do gradiente chegou a mais de 3 kt/100 ft, ou seja, não chega a reproduzir sequer uma ocorrência de WS leve. Isso quer dizer que as configurações do modelo presentes nos experimentos Exp1 e Exp2, citando a baixa resolução vertical próxima ao solo, não se mostraram confiáveis para a reprodução de WS nas proximidades de SBGR. Por outro lado, nos experimentos Exp3 e Exp4, o WS medido a partir dos resultados do modelo chega a ser superior a 12 kt/100 ft em alguns momentos, revelando que a alta resolução vertical em baixos níveis é importante para a correta representação do fenômeno. Além disso, há pouca diferença entre os valores do WS entre os experimentos 3 e 4: o valor obtido pelo Exp4 é de 1 a 2 kt/100 ft maior do que a do Exp3. Isso mostra que a adoção de uma alta resolução na representação de topografia e solo melhora os resultados para a detecção da WS.

Com relação aos horários, o modelo WRF mostrou uma tendência em antecipar a hora da ocorrência, como pode se observar na Fig. 16, em que o fenômeno ocorre entre 18 e 20 UTC do dia 28/01/2017, cerca de 11 a 13 h antes. Isso também ocorreu nos outros dias simulados (apresentados em Ribeiro, 2019), variando de 6 a 12 h de antecipação. Esse mesmo resultado também foi observado por Cardoso (2016), analisando outro conjunto de dados de SODAR de período diferente. Para efeito comparativo, a intensidade de WS do mesmo período, medida pelo SODAR, está na Fig. 8. Apesar destas simulações não representarem os fenômenos na hora exata da ocorrência, elas foram capazes de mostrar a ocorrência do WS.

4. Conclusão

Este trabalho proporcionou um estudo observacional e de modelagem atmosférica sobre os riscos relacionados à ocorrência de cisalhamento do vento (WS) no Aeroporto Internacional de São Paulo, em Guarulhos - SP (SBGR).

Os dados obtidos do SODAR, quando comparados com a quantidade de *reportes* de WS pelos pilotos, revelaram pouca coincidência entre o fenômeno medido e o observado na prática (31,3%). Isto ocorre, possivelmente, pela curta duração e pequeno alcance vertical do WS, já que o equipamento utilizado faz medições a cada 15 minutos, períodos em que nem sempre há voos naquela

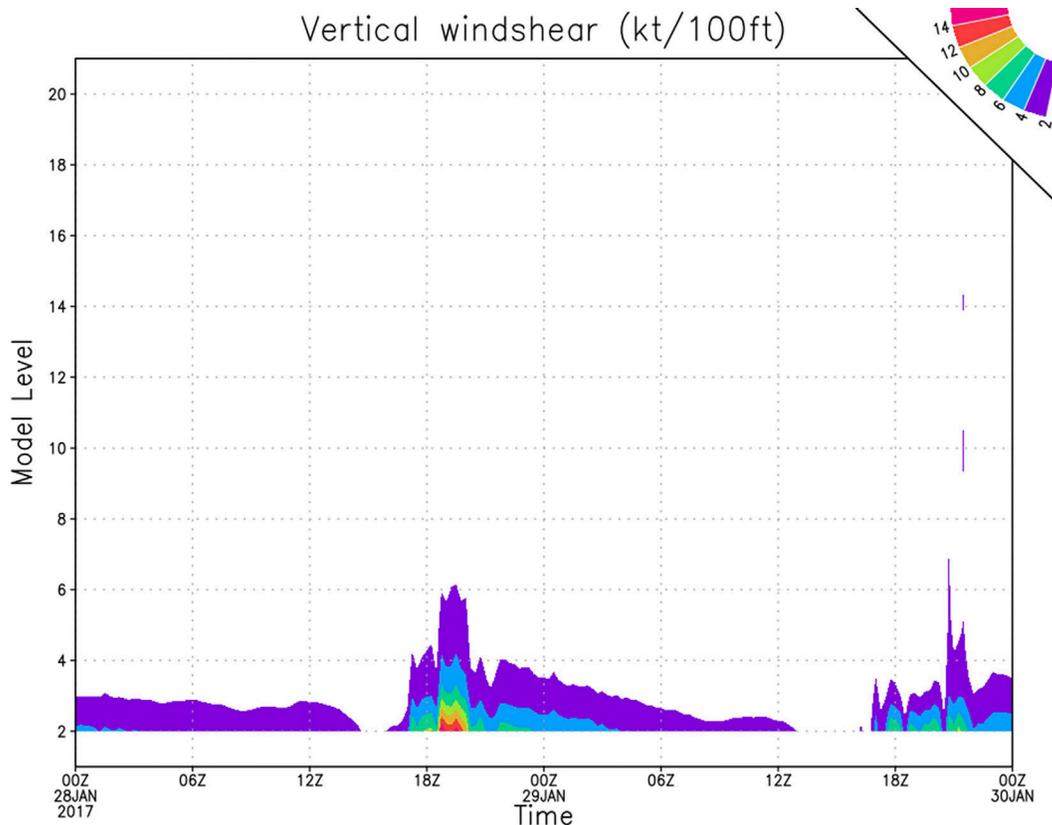


Figura 16 - Evolução temporal do WS (em kt/100 ft) nos primeiros 20 níveis do Exp4 para os dias 28 e 29 de janeiro de 2017.

cabeceira, particularmente no período noturno, quando ocorre uma menor frequência de pousos. Outro resultado relevante é a maior ocorrência de WS extremos e severos nos meses de verão, predominando a madrugada e a noite como períodos do dia com mais registros. Isto ocorre, provavelmente, pela forte convecção formada ao longo do dia. A faixa de altitude com maior quantitativo de registros destas intensidades foi de 0 a 100 ft (30,5 m). Enquanto isso, os meses com mais registros de WS por pilotos foram dezembro e julho.

Para a parte experimental do trabalho, foram realizadas 4 tentativas de simular o WS, com mudanças nas condições e configurações da superfície (dados de entrada estáticos com alta resolução, tanto de topografia como uso de solo, além de uma maior resolução vertical nos primeiros níveis de altura do modelo). A parte de validação do modelo, com relação às parametrizações de camada limite, já foi realizada anteriormente por [Silva et al. \(2016\)](#). Os resultados numéricos foram comparados com dados observacionais de SODAR, para um estudo de caso em que se observou WS extremo em SBGR. Os valores de WS encontrados no Exp3 e Exp4 conseguiram reproduzir o cisalhamento do vento nos baixos níveis e são bem próximos entre si, com pequena vantagem em relação ao Exp4, com valores entre 1 e 2 kt/100 ft superiores as observações. Estes resultados servem como indícios de

que as configurações dos Exp3 e Exp4 possam ser utilizadas como ferramentas de previsão do fenômeno, com a antecedência de 11 a 13 h, sendo assim, potencialmente útil para emissão de alertas para o aeroporto SBGR, que é o aeroporto com maior número de pousos e decolagem do Brasil.

Agradecimentos

À Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), ao Comando da Aeronáutica (COMAER), através do Departamento do Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e do CTCEA, pela colaboração e cessão dos dados do perfilador SODAR do Aeroporto de Internacional de São Paulo em Guarulhos. Agradece-se também ao Conselho Nacional Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos auxílios financeiros concedidos nos Processos N° 150324/2018-9 e 308011/2014-7).

Referências

AVIATION SAFETY NETWORK. Aircraft Accident, Lockheed L-1011 Tristar 1 N726DA, Dallas/Fort Worth International Airport, TX (DFW). **Aviation Safety Network**, 2019. Dis-

- ponível em: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=19850802-0>. Acesso em: 01 de abr. 2019.
- BRASIL. **PORTARIA DECEA N° 15/ICA**. Departamento de Controle de Tráfego Aéreo, 2015. Disponível em: <http://servicos.decea.gov.br/arquivos/aga/planos/a3469628-2e67-4754-b765871750edd99f/portaria.pdf>. Acesso em: 01 de mai. 2017.
- BRASIL. **FCA 58-1: ocorrências aeronáuticas - panorama estatístico da aviação brasileira 2006-2015**. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Brasília, DF, p. 14-16, 2016.
- BRASIL. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Boletim Técnico 29/01/2017-00Z**, 2017a. Disponível em: <http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>. Acesso em: 10 abr. 2019.
- BRASIL. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Casos significativos no mês de janeiro de 2017**, 2017b. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/129032>. Acesso em: 10 abr. 2019.
- CABRAL, E. **Meteorologia aeronáutica**. Aula - Piloto da TAM, p. 48, 2006.
- CARDOSO, L.F.N. **Análise da sensibilidade ao uso de dados de SODAR e às configurações físicas do modelo WRF em simulações numéricas de tesoura de vento no aeroporto de Guarulhos**. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- CHAN, P.W.; HON, K.K. Observation and numerical simulation of terrain-induced windshear at the Hong Kong International Airport in a planetary boundary layer without temperature inversions. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 1-9, 2016.
- CHO, J.Y.N.; HALLOWELL, R.G.; WEBER, M.E. Comparative analysis of terminal windshear detection systems. In: **13th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology**, New Orleans, Amer. Meteor. Soc., 2008.
- DEE, D.P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.
- DRAXL, C.; HAHMANN, A.N.; PEÑA, A.; GIEBEL, G. Evaluating winds and vertical wind shear from Weather Research and Forecasting model forecasts using seven planetary boundary layer schemes. **Wind Energy**, v. 17, n. 1, p. 39-55, 2014.
- LINDEN, P.F.; SIMPSON, J.E. Microbursts: a hazard for aircraft. **Nature**, v. 317, n. 6038, p. 601-602, 1985.
- FAA. Federal Aviation Administration. **AC-0054 - Pilot Wind-shear guide**. FAA, Washington DC, p. 64, 1988.
- FAA. Federal Aviation Administration. **P-8740-48 Wind shear**. FAA, Washington DC, p. 64, p. 8, 2008.
- FUJITA, T.T. Downbursts and microbursts - An aviation hazard. In: **Nineteenth Conference on Radar Meteorology**. Boston: The American Meteorological Society. p. 94-101, 1980.
- MERSEREAU, D. Explaining Microbursts, One of Nature's Most Dangerous Wind Storms. **The Vane**, 2014. Disponível em: <http://thevane.gawker.com/explaining-microbursts-one-of-natures-most-dangerous-w-1643929336>. Acesso em: 11 de abr. de 2019.
- NATIONAL WEATHER SERVICE. **What is a Microburst?** NWS Birmingham, Alabama, 2011. Disponível em: https://www.weather.gov/bmx/outreach_microbursts. Acesso em: 17 de abr. 2019.
- REDEMET. Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. **Windshear**, 2013. Disponível em: <https://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2014/04/windshear.pdf>. Acesso em: 02 de abr. de 2019.
- REDEMET. Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. **Mensagens OPMET**, 2019. Disponível em: <https://www.redemet.aer.mil.br/>. Acesso em: 07 de abr. 2019.
- RIBEIRO, D.P.; FISCH, G.; LEAL JR., J.B.V.; SOKABE, E.D.J.R. Estudo da ocorrência de cisalhamento do vento no Aeroporto Internacional de São Paulo. **Revista Conexão SIPAER**, v. 8, n. 2, p. 54-65, 2017.
- RIBEIRO, D.P. **Estudo da ocorrência do cisalhamento do vento no Aeroporto Internacional de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). São José dos Campos, SP, p. 101, 2019.
- SCINTEC AG. **Software Manual - APRun**. Scintec Ag. Rotenburg, 2013.
- SEZ, J. Microburst - a deadly killer. **AeroMedical Journal**, v. 1, n. 5, p. 24, 1986.
- SHAW, B.L.; SPENCER, P.L.; CARPENTER JR., R.L.; BARRERE JR., C.A. Implementation of the WRF model for the Dubai International Airport Aviation Weather Decision Support System. In: **13th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology**. New Orleans, LA: American Meteorological Society, 2008.
- SHIN, H.H.; HONG, S.-Y.; DUDHIA, J. Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary layer parametrizations. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 2, p. 664-682, 2012.
- SILVA, H.A.J.S. **Análise das ocorrências de cisalhamento de vento no aeroporto de Guarulhos (SP) para a prevenção de acidentes aeronáuticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, 2016.
- SILVA, W.L.; ALBUQUERQUE NETO, F.L.; FRANÇA, G.B.; MATSCHINSKE, M.R. Conceptual model for runway change procedure in Guarulhos International Airport based on SODAR data. **The Aeronautical Journal**, v. 120, n. 1227, p. 725-734, 2016.
- SPENCER, R.; TYNAN, M. **Windshear, microbursts, thunderstorms and lightning strikes: Phenomena identification and impacts in flight**. Griffith University. Brisbane, p. 7-13, 2015.
- STORM, B.; DUDHIA, J.; BASU, S.; SWIFT, A.; GIAMMANCO, I. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model on forecasting low-level jets: implications for wind energy. **Wind Energy**, v. 12, n. 1, p. 81-90, 2009.
- VILLIERS, M.P. de; WHITE, D. Near-surface winds and wind shear at four airports during the 'St Jude's day storm'. **Weather**, v. 69, n. 11, p. 288-294, 2014.