

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
IAG-USP

HIREMAR ANTÔNIO J. S. SILVA

ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS DE CISALHAMENTO DE VENTO, COM A UTILIZAÇÃO DO SODAR, NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS – GOVERNADOR ANDRÉ FRANCO MONTORO – PARA A PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS

São Paulo
Dezembro - 2016

HIREMAR ANTÔNIO J. S. SILVA

ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS DE CISALHAMENTO DE VENTO, COM A UTILIZAÇÃO DO SODAR, NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS – GOVERNADOR ANDRÉ FRANCO MONTORO – PARA A PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS

Síntese da dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

Dezembro - 2016

Nome: Hiremar Antônio J. S. Silva

Título: Análise das ocorrências de cisalhamento, com a utilização do SODAR, de vento no aeroporto internacional de São Paulo/Guarulhos – Governador André Franco Montoro – para a prevenção de acidentes aeronáuticos.

Síntese da dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

Aprovado em: 06/12/2016

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ricardo de Camargo
Orientador

Prof. Dr. Edson Cabral
Examinador (a)

Prof. Dr. Gutemberg Borges França
Examinador (a)

RESUMO

A partir de um estudo realizado pelo *National Aviation Safety Data Analysis Center* (NASDAC), período de 1992 a 2001 e do sistema *Aviation Safety Information Analysis and Sharing* (ASIAS), desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA), no período de 2003 a 2007, ambos utilizaram dados da *National Transportation Safety Board* (NTSB), constata-se que aproximadamente 21% do total de acidentes aeronáuticos foram devidos a fatores meteorológicos, sendo apontado o vento como responsável majoritário dos casos. Além disso, sabe-se que o maior índice de acidentes/incidentes aeronáuticos ocorre nos procedimentos de decolagem, pouso e aproximação de aeronaves às cabeceiras de pistas, estando relacionados a fatores meteorológicos como o cisalhamento do vento e a turbulência. Assim sendo, este estudo tem como foco principal a análise de informações referentes ao Aeroporto Internacional de Guarulhos, São Paulo, o primeiro entre os aeroportos do Brasil a operar um SODAR (***S*onic *D*etection *A*nd *R*anging**), equipamento perfilador de vento que contribui na prevenção de acidentes aeronáuticos. As medições do SODAR foram obtidas entre julho de 2012 e março de 2015. A metodologia envolveu uma análise subjetiva de todas as informações meteorológicas disponíveis para os casos de interesse de *windshear* - termo em inglês para cisalhamento do vento, os quais foram classificados em função da severidade do fenômeno. Em seguida, os casos foram agrupados para a identificação de características comuns que permitam uma interpretação objetiva dos eventos. No período analisado, aproximadamente 88% dos casos referem-se à intensidade moderada do cisalhamento do vento, 10% de eventos fortes e os 2% restantes em casos severos. Do ponto de vista das situações meteorológicas com potencial de causar *windshear*, foi possível notar que a esmagadora maioria dos casos esteve associada à presença de convecção ou então a situações pré-frontais ou frontais sobre o aeródromo. Além destes, também ocorreram casos com a presença de complexos convectivos de mesoescala (CCM) sobre a Região Sul do Brasil. Em geral, estas situações relacionadas a casos severos e fortes de cisalhamento do vento ocorrem em função da intensificação do fluxo de componente norte sobre o Aeroporto de Guarulhos, o qual interage com a topografia da Serra da Cantareira originando o fenômeno. No entanto, casos de *windshear* com intensidade forte e moderada podem ocorrer em situações não necessariamente associadas a condições frontais ou pré-frontais. Foram detectadas inúmeras situações pós-frontais em que o vento gira de sudeste (SE) para nordeste (NE) com a elevação de altura, o que significa que a interação com a topografia não é necessária para produzir os fenômenos. Outro ponto relevante diz respeito à intensidade do vento de superfície, pois a intensidade do cisalhamento independe do escoamento superficial apenas. A principal característica das medições do SODAR e que pode ser utilizada em termos práticos para a previsão deste tipo de evento refere-se à formação de uma estrutura aqui denominada “tubo”, o qual foi detectado em inúmeros casos moderados e fortes. Apesar disto, nos seis eventos severos de *windshear* detectados, esta estrutura não esteve presente.

Palavras-chave: cisalhamento do vento; perfilador de vento; acidentes aeronáuticos

ABSTRACT

From a study conducted by the National Aviation Safety Data Analysis Center (NASDAC) from 1992 to 2001 and the Aviation Safety Information Analysis and Sharing (ASIAS) system, developed by the Federal Aviation Administration (FAA), from 2003 to 2007, both used data from the National Transportation Safety Board (NTSB), it is observed that approximately 21% of the total aeronautical accidents were due to meteorological factors, with wind being the majority responsible for the cases. Moreover, it is well known that aeronautical accidents occur mostly within take-off, landing and approaching procedures, being related to meteorological factors such as windshear and turbulence. Therefore, this study is mainly focused in the analysis of the information collected at Guarulhos International Airport, Sao Paulo State, the first among the Brazilian airports to have a SODAR (***Sonic Detection And Ranging***), a wind profiler instrument which contributes for accidents prevention. SODAR measurements were obtained between July 2012 and March 2015. The methodology was based on a subjective analysis of the whole set of meteorological information for all the cases of windshear, which were classified in terms of their intensity and then grouped in order to identify common characteristics that allow an objective interpretation of the events. Within the studied period, 88% were related to moderate intensity of windshear, 10% of strong intensity and the remaining 2% had severe windshear. Nevertheless, moderate and strong windshear can occur without association to frontal or pre-frontal situations. Several post-frontal conditions with SE surface flow and steering to NE with height presented moderate to strong windshear, meaning that interaction with topography is not necessary to produce the phenomena. Another relevant point is related to the velocity of the surface flow, since the windshear intensity is independent of the surface wind. The main characteristic of the SODAR data that can be used in practical aspects to forecast this kind of event is related to the formation of a vertical structure of windshear direction here called “pipe”, which appeared in several cases of moderate and strong windshear. Despite this fact, this structure was not present for the six detected cases of severe windshear.

Key-words: windshear; wind profiler; aeronautical accidents

1.Introdução

O primeiro registro de acidente de uma aeronave por cisalhamento do vento (em inglês *windshear*) data de 24 de junho de 1956 em Kano, Nigéria, conforme citado por Villela (2002). Contudo, o aprimoramento dos estudos deste fenômeno nas fases críticas de pouso e decolagem teve início em meados da década de 70 com a análise do Prof. T. Theodore Fujita, da Universidade de Chicago, sobre o notório acidente com o Boeing 727 do voo 66 da *Eastern Airlines*, ocorrido no Aeroporto John F. Kennedy em Nova York, no dia 27 de junho daquele ano (Fujita e Carracena,1977).

No Brasil, pode-se citar o caso de um acidente notório que ocorreu com a aeronave Rockwell 681 H.Commander, cuja matrícula era PT-IEE. O impacto com o solo ocorreu 2 minutos após a decolagem do Aeroporto de Congonhas/SP (designação IATA: CGH, ICAO: SBSP), sobre casas do bairro de Vila Anhanguera, cerca de 5 km da cabeceira sul (pista 35), SBSP está localizado a 28 km do Aeroporto Internacional de Guarulhos (designação IATA: GRU, ICAO: SBGR).

Em ambos os acidentes exemplificados acima, a investigação mostra nuvem do tipo CB presente na região e como causadora de *windshear*. No entanto, outros fatores podem causar tal fenômeno meteorológico, tais como inversão térmica noturna, ondas de montanha, sistemas frontais e brisas dentre outros (SOUZA, 2010).

SBGR é o aeródromo brasileiro onde há maior tráfego de aeronaves (Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo – DECEA, 2015); conforme informações do REDEMET, ele ocupa o primeiro lugar em ocorrência de *windshear* (WS) reportado por pilotos, nos procedimentos de pouso e decolagem (Gráfico 1). Por este motivo, dentre os aeroportos do Brasil, SBGR foi o primeiro a utilizar operacionalmente um equipamento perfilador de vento do tipo SODAR (**S**onic **D**etection **A**nd **R**anging), o qual pode contribuir efetivamente na prevenção de acidentes aeronáuticos.

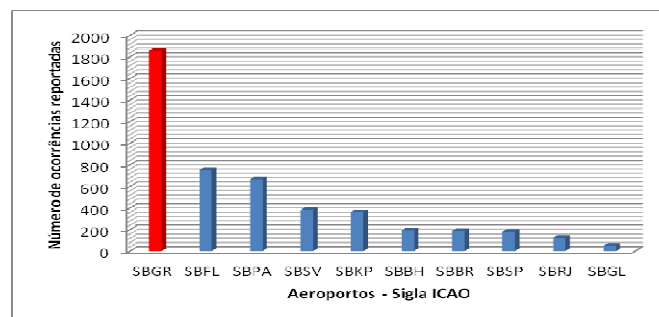


Gráfico 1: Reportes de *windshear* (WS) em ordem decrescente no período de 1999 a 2013 de alguns aeroportos brasileiros discriminados pela sua sigla ICAO.

Fonte: Adaptado de Matschinske (2012).

Segundo Matschinske (2012), SBGR apresentou neste período 1.857 reportes. O segundo aeroporto brasileiro em reportes de cortante do vento foi o SBFL (Florianópolis), chegando a 751 casos. Conforme citado na REDEMET, em ambos os casos, a principal causa é a onda de montanha, que se forma sobre o alinhamento das serras existentes ao norte/noroeste do aeroporto de Guarulhos e a oeste de Florianópolis.

1.1.Windshear - Cisalhamento do vento

O termo em inglês *Windshear* (WS), utilizado comumente na aviação, também pode ser denominada de cortante de vento, gradiente de vento, tesoura de vento ou cisalhamento de vento. É definida como um tipo de turbulência, à baixa altura, que afeta as operações de pouso e decolagem das aeronaves, devida a uma variação local na direção e/ou na velocidade do vento em determinada distância. Portanto, o cisalhamento pode ser classificado como:

- I. Direcional - varia apenas de direção com a altura;
- II. Por velocidade - varia apenas a velocidade com a altura e
- III. Direcional e velocidade - o cisalhamento é função de ambos fatores de acordo com a variação da altura.

Para fins aeronáuticos, Segundo o Folheto do Comando da Aeronáutica (FCA 105-3/2017), a cortante do vento ao longo das trajetórias de decolagem ou de aproximação entre o nível da pista e 500 metros (1.600 pés). A intensidade do cisalhamento vertical do vento horizontal é determinada com base no Manual ICAO (2005), de acordo com a Tabela 1.

INTENSIDADE	VARIAÇÃO (m.s ⁻¹ / 30m)	VARIAÇÃO (kt / 100ft)
LEVE	0,00 - 2,09	0 - 4
MODERADA	2,61 - 4,18	5 - 8
FORTE	4,70 - 6,26	9 - 12
SEVERA	Maior que 6,26	Maior que 12

Tabela 1: - Critérios para a intensidade de cisalhamento de vento recomendada pela Quinta Conferência de Navegação Aérea (Montreal, 1967).

Fonte: Adaptado de ICAO (International Civil Aviation Organization)

1.2.Sistemas meteorológicos atuantes e potencialmente causadores de WS

Pode ser produzida por fenômenos meteorológicos em diversas escalas espaço-temporais, tais como: jatos de baixos níveis, sistemas frontais, brisa marítima, ondas de montanha, camadas de inversão de temperatura e trovoadas, todos capazes de produzir fortes variações na direção e/ou na velocidade do vento. Nuvens do tipo CB, que produzem raios, chuva, ventos fortes e até mesmo, tornados. Em aproximadamente 5% das tempestades a WS é produzida devido ao fenômeno, cuja denominação em inglês é chamado de *downburst*, *microburst*¹ e *outburst* (Boletim SBMET, 2005; Fujita, 1985). Na Figura 1, observa-se o movimento da massa de ar e os vórtices gerados quando um *microburst* atinge o solo.

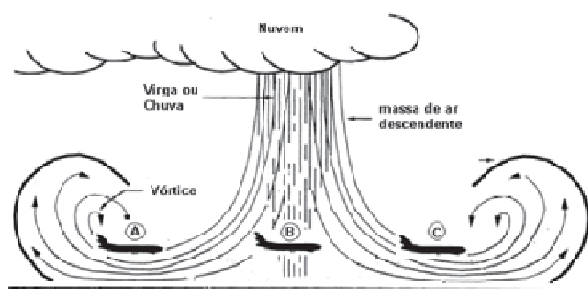


Figura 1: Microburst de baixa altitude.

Fonte: Adaptado de AC 00-54.

2.METODOLOGIA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho chama a atenção para a necessidade de explorar mais profundamente o fenômeno meteorológico *windshear* por sua enorme relevância, e por ocorrer potencialmente em todos aeroportos do território nacional. Aspectos específicos sobre cisalhamento de vento serão apresentados na sequência deste capítulo.

Dadas as características do fenômeno em questão, é necessário utilizar equipamentos sofisticados que sejam capazes de identificá-los localmente e instantaneamente. Os dados do SODAR obtidos junto à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – INFRAERO – foram inseridos no *software APRun version 1.40* para as devidas análises. O SODAR localizado na cabeceira 27 havia maior quantidade contínua de dados, portanto utilizado como base para a pesquisa, já os dados do SODAR da cabeceira 09 foram utilizados principalmente de forma consultiva.

Baseado nas informações de perfil de ventos foi possível a identificação dos casos de WS significativos à aviação, conforme critérios de severidade; cada caso identificado foi colecionado e sua relação/associação com algum sistema meteorológico que potencialmente o “disparou” foi devidamente verificada.

1 Microburst é um intenso fluxo descendente de vento capaz de derrubar uma aeronave, tirando sua sustentação

Em seguida, para análise da correlação de WS com fluxo de tráfego aéreo, utilizou-se o Anuário Estatístico Operacional de 2012, INFRAERO e Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo de 2013, CGNA.

A partir da Rede Meteorológica do Comando da Aeronáutica, REDEMET, foi possível obter informações de METAR/SPECI dos anos de 2012 a 2015 dos aeroportos SBGR, SBSP e SBMT, além das imagens de RADAR meteorológico de São Roque/SP; as imagens de satélite foram disponibilizadas pelo *site* do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).

Foi de fundamental importância a identificação da intensidade forte e severa de acordo com o valor máximo de variação de velocidade em relação à altura, em um mesmo período contínuo, ou seja, em um caso identificado como severo (Tabela 1 e Figura 2) que perdurou por mais de 4 horas, por exemplo, houve um máximo entre as 22h e 23h. Portanto, este caso foi identificado como severo.

INTENSIDADE	VARIAÇÃO (m.s-1 / 30m)	VARIAÇÃO (kt / 100ft)
LEVE	0,00 - 2,09	0 - 4
MODERADA	2,61 - 4,18	5 - 8
FORTE	4,70 - 6,26	9 - 12
SEVERA	Maior que 6,26	Maior que 12

Tabela 1. Intensidade do cisalhamento.

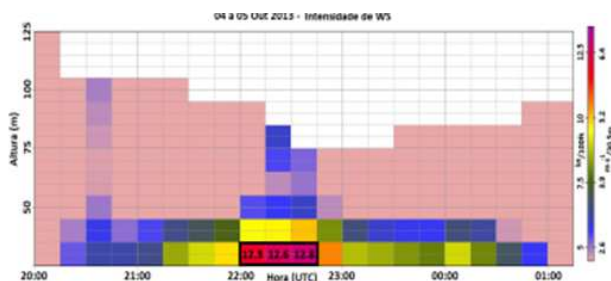


Figura 2: Tempo de duração de WS pela intensidade do fenômeno, neste caso, classificado como Severo.

O risco fatal para aeronaves próximas ao solo em situações de WS é a súbita perda de sustentação e a consequente drástica perda de altitude, causa primária dos acidentes. Com relação a isso, cabe uma mínima explicação sobre os princípios da sustentação aerodinâmica.

No campo aeronáutico fala-se de quatro forças que agem sobre a aeronave em voo (Figura 3):

- Força de Tração (T) - Gerada pelo motor que impulsiona a aeronave para frente, quanto maior é a potência do motor, maior é a força “T”.
- Força de Arrasto (A) - Gerada pela resistência do ar. Tem sentido contrário à força “T”. Quanto mais alto é o voo, menor é a força A devido ao ar ser mais rarefeito o que leva a economia de combustível.
- Força gravitacional (G) - É a denominada força peso, que é a ação da gravidade terrestre sobre todos os corpos.
- Força de Sustentação (S) - É a força gerada pelo fluxo de ar que passa pela asa de uma aeronave que tem sentido contrário à força “G”.

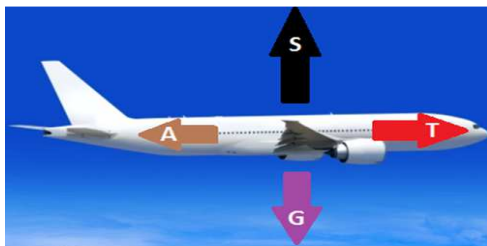


Figura 3: A figura ilustra as quatro forças que agem sobre uma aeronave, segundo o “jargão” aeronáutico. Fonte: Adaptado de <http://topbrasilturismo.wordpress.com>

Baseado nas quatro forças apresentadas, a explicação mais simples para que uma aeronave possa voar é que a tração seja maior que o arrasto assim como a sustentação seja maior que a gravidade.

2.1.O SODAR

Segundo Coulter e Kallistratova (2003), na década de 1970 houve um aumento na taxa de estudos da Camada Limite Planetária devido a pesquisadores no campo da acústica e após a criação da Sociedade de Sensoriamento Remoto Acústico da Atmosfera e Oceanos (*Society for Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans - ISARS*), em 1979, foram apresentados simpósios com dados e trabalhos coletado há mais de 20 anos na área. Ainda, conforme citado por Coutler e Kallistratova (2003), mais de 60% dos trabalhos foram dedicados ao Sensoriamento Remoto Acústico da Camada Limite Atmosférica (CLA), com a ajuda do equipamento SODAR.

SODAR é um instrumento acústico para medições remotas de perfis tridimensionais de velocidade e direção do vento, bem como características de turbulência na atmosfera inferior, ou seja, na CLP, portanto, é um instrumento significativo para o campo da micrometeorologia.

Em operação, a antena emite pulsos sonoros, que são retro-espalhados por heterogeneidades de temperatura no ar. A antena, em seguida, recebe os ecos dos pulsos sonoros. A partir da onda retroespalhada, obtém-se detalhes sobre a estrutura da turbulência na Camada Limite Planetária (CLP) assim como o vento é determinado pela avaliação do espectro dessa mesma onda. Essa análise é possível devido à mudança de frequência dessa onda causada pela inhomogeneidade de temperatura da atmosfera, esse desvio é o notório efeito Doppler.

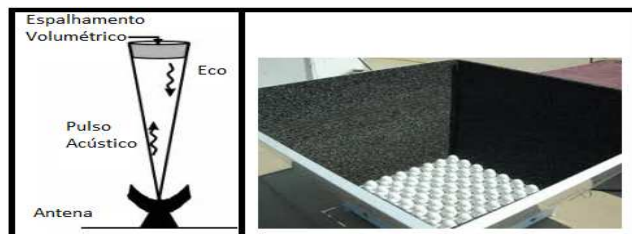


Figura 4: Modelo de funcionamento (esquerda), equipamento de proteção e antena (direita).

Fonte: Adaptado de <http://www.salford.ac.uk> (esquerda) e <http://www3.nd.edu/> (direita).

Vale salientar que o equipamento possui algumas restrições para o uso. Por ser um instrumento acústico, a umidade e a temperatura na área de atuação assim como o som do ambiente (ruídos) interferem diretamente na acurácia e resolução de altura para o estudo dos ventos. Portanto a antena deve ser protegida por um envólucro acústico a fim de diminuir a interferência externa.

Ainda, equipamentos como o RADAR meteorológico, que emitem ondas eletromagnéticas, ou o próprio SODAR, onda sonora, são utilizados por pesquisadores para sondagens remotas da atmosfera sendo assim, nesta interação, há perda de energia.

Observa-se em Harris (1966), publicado em *The Journal of the Acoustical Society of America*, a influência da temperatura e umidade na interação da absorção do som para diferentes frequências. Uma vez que o SODAR MFAS possui uma frequência variável entre 1650 e 2750 Hz, verifica-se no Gráfico 2 a representação dessas variáveis atmosféricas na atenuação do som.

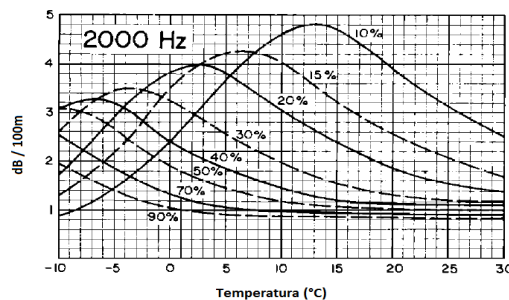


Gráfico 2: Mostra a atenuação da onda sonora em função da temperatura e da umidade atmosférica.

Fonte: Adaptado de Harris (1966).

3.RESULTADOS

No Brasil, equipamentos de detecção desse fenômeno em aeroportos são escassos, por isso os dados estatísticos ainda são gerados por informe de pilotos com base dos sistemas de alerta de alguns

tipos de aeronaves, capazes de informar o perigo iminente. Tais informes são inseridos pelo observador meteorológico de uma EMS, no instante em que recebe tal informação, através do **Sistema de Controle Operacional de METeorologia (SISCOMET)**, *software* pertencente ao Comando da Aeronáutica.

O Gráfico 3 mostra média mensal dos três (03) aeroportos do país onde há maior reporte dos fenômenos no período de quinze (15) anos. O Gráfico 4 mostra o comparativo de ocorrências de WS por reporte de piloto em relação detectado pelo SODAR.

**Reportes Mensais de Gradiente de Vento em SBGR
(1999 a 2013)**

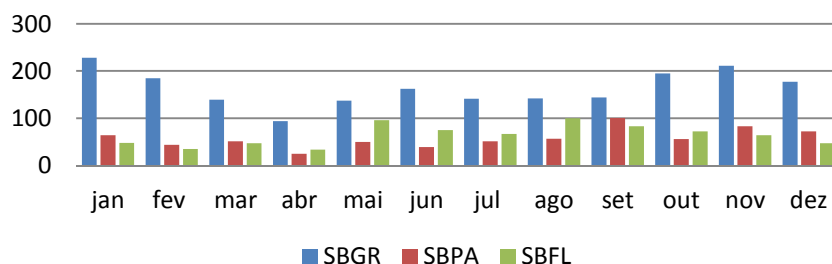


Gráfico 3: Distribuição mensal de cortante do vento nos três aeródromos de maior reporte do fenômeno no Brasil. O aeroporto SBGR apresenta uma maior variação ao longo do ano, com picos em janeiro e novembro. Fonte: Adaptado de REDEMET.

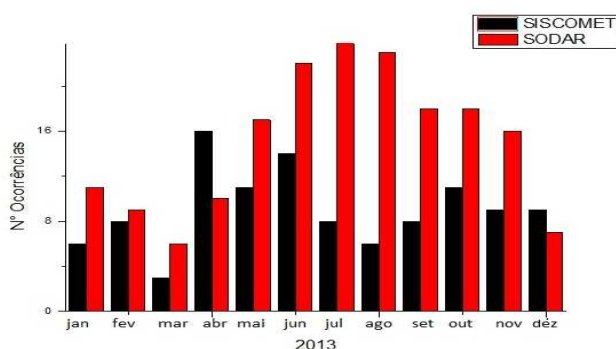


Gráfico 4: Comparação anual entre os totais de eventos mensais de WS registrados pelo SISCOMET e pelo SODAR do aeroporto SBGR, para o ano de 2013, o mais completo de dados.

O gráfico deixa visível que, na maioria dos casos, o número de WS detectado pelo equipamento fixo no aeroporto é maior que o informado por pilotos. Isto indica que a estatística que é obtida hoje no Brasil é subestimada, uma vez que o SISCOMET é dependente da quantidade do tráfego de cada aeroporto enquanto o SODAR está fixo e gera dados de forma constante.

É importante ressaltar no Gráfico 4, que em dezembro de 2013, haviam apenas 10 dias de dados. É possível que este fator tenha contribuído para um maior número de ocorrências do SISCOMET em relação ao SODAR.

Com base no *Anuário Estatístico Operacional 2012*, o qual informa os movimentos operacionais dos 66 aeroportos administrados pela INFRAERO, no referido ano, pode-se verificar a importância do Aeroporto de Guarulhos/Cumbica, SBGR ao país e enfatizar a necessidade na prevenção de acidentes aeronáuticos devido ao imenso volume de aeronaves, cargas e passageiros que transitam diariamente neste local. Conforme informado pelo próprio anuário, os dados apresentados são obtidos através de formulários próprios preenchidos pelas Companhias Aéreas e enviados a cada aeroporto da rede INFRAERO.

O Gráfico 5 mostra a classificação decrescente dos dez aeroportos brasileiros da maior movimentação de aeronaves, pousos e decolagens, do ano de 2012. Pode-se observar que SBGR possuiu, no ano de 2012, um movimento de aproximadamente 274.000 por ano e pouco mais de 60.000 em relação ao segundo colocado, o Aeroporto de Congonhas (SBSP), localizado na cidade de São Paulo/SP.

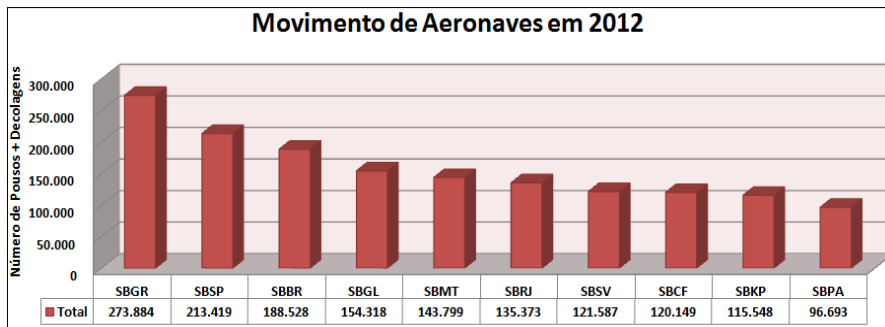


Gráfico 5: Os 10 aeroportos brasileiros com maior movimento de aeronaves no ano de 2012.
Fonte: Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.

3.1. Horário de ocorrência de WS versus movimento de passageiros

Dos fenômenos detectados, pelos dados obtidos, foram discriminados quatro horários diferentes, em porcentagem de ocorrências e utilizado o movimento típico de passageiros no aeroporto de SBGR. Em um período de 24 horas, a madrugada possui o menor fluxo de passageiros, bem como a menor porcentagem de WS, 16,59%; a tarde possui a maior porcentagem, em torno de 34,56%, porém há um sensível decréscimo no número de passageiros nesta faixa de horário; por fim, os períodos da manhã e noite apresentam um intenso movimento associado em média a 22,73% e 26,11% casos de WS, respectivamente. Todos estes valores de porcentagens equivalem à média de ocorrência entre ambas as pistas.

O gráfico 8 mostra o montante de passageiros em um período de 24h nos quatro períodos distintos (madrugada, manhã, tarde e noite) bem como a porcentagem, dos casos identificados de WS em cada cabeceira que os equipamentos estão localizados.



Gráfico 6: Movimento de passageiros em um dia típico e a porcentagem de ocorrência de WS por período em ambas as cabeceiras.

Fonte: Adaptado de Anuário estatístico da INFRAERO, 2012.

3.2. Altura e intensidades dos casos identificados

Foram separadas as ocorrências de WS em três tipos de intensidades: moderado, forte e severo, tendo em vista as informações de informe dos pilotos extraídas do SISCOMET, nas quais não houve reporte de WS do tipo leve, conforme o Gráfico 7.

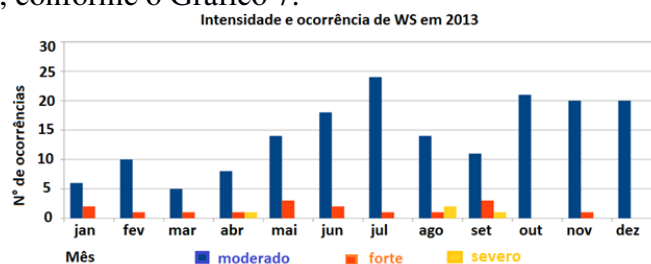


Gráfico 7: Variação mensal das intensidades de WS em SBGR no ano de 2013.

Os fenômenos identificados foram discriminados em quatro (04) faixas de altura (Z), e após análise pode-se verificar que a faixa abaixo de 100m é detentora da predominância – maior que 90% se considerarmos a média de todos os dados - dos casos de WS, conforme a Tabela 2.

Porcentagem de WS Identificada por Faixa de Altura				
Altura(Z)	≤100m	100m < Z ≤200m	200m < Z ≤300m	300m < Z ≤500m
Ano 2012	<u>89,83%</u>	3,39%	0,00%	6,78%
Ano 2013	<u>97,78%</u>	0,00%	0,71%	1,51%
Ano 2014	<u>90,13%</u>	0,66%	0,66%	8,55%
Ano 2015	<u>97,73%</u>	2,27%	0,00%	0,00%

Tabela 2: Porcentagem de ocorrência de WS de acordo com cada faixa de altura e discriminada pelo ano de ocorrência.

O Gráfico 8 mostra valores percentuais de WS, com base em sua intensidade do cisalhamento do vento. Esse fato é de vital importância, pois quanto mais próximo da superfície e maior a intensidade do fenômeno, menor será o tempo de reação para evitar o choque da aeronave com o solo.

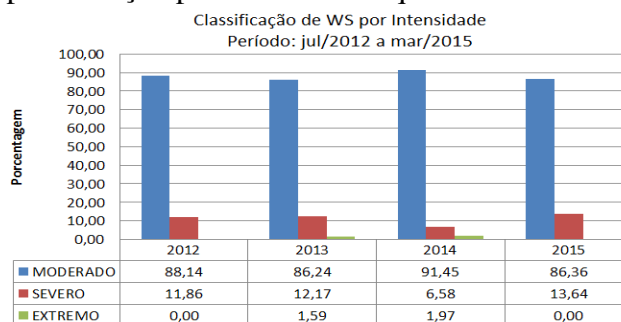


Gráfico 8: Valores percentuais de WS, com base em sua intensidade e separados pelo ano de ocorrência no aeroporto de Guarulhos.

Observou-se ainda que alguns casos de WS perduraram por várias horas de forma contínua, sendo assim, criou-se uma tabela com o intuito de verificar a significância do fato.

Tabela 3: Mostra o tempo médio de duração do cisalhamento do vento, em horas, associada a intensidade deste fenômenos em SBGR.

Tempo de Duração por Intensidade de WS no Aeroporto de Guarulhos (SBGR)						
Intensidade	Tempo	T≤0,5h	0,5<T≤1,0h	1,0h<T≤2h	2h<T≤3h	T>3h
	Moderado	<u>61%</u>	16%	15%	4%	5%
	Forte	7%	11%	24%	16%	<u>42%</u>
	Severo	17%	0%	0%	0%	<u>83%</u>

3.3.Características das medições do SODAR

Um importante fator observado e que pode auxiliar no prognóstico de WS é um comportamento padrão para ocorrências que duram um intervalo de tempo maior que 30 minutos, como exemplificado no evento do dia 12 de setembro de 2013. As séries temporais da direção da WS entre 05 e 17UTC (Figura 5), da intensidade de WS entre 06 e 12UTC (Figura 6) e do perfil medido do vento entre 00 e 12UTC (Figura 7) apresentam um dos casos analisados. Ao observar a direção da WS no software APRun (Figura 6), verifica-se uma faixa com direção norte-noroeste (NNW) e adjacente a esta faixa, o vetor direção da WS varia para leste-sudeste (ESE) ou leste-nordeste (ENE). A linha inferior desta faixa normalmente ocorre entre 100m e 200m e a parte superior, entre 300 e 400m, conforme o exemplo da Gráfico 8. Ademais, há mais fatores a serem verificados para ajudar na detecção e prognóstico de WS. Se há esta faixa central, o previsor pode analisar outros fatores como a direção do vetor vento horizontal pelo perfil vertical. Conforme a Figura 7, o vento varia de ESE (superfície) a NE (camadas mais elevadas), essa variação é gradativa e a velocidade do vento acima de 100m de altura, onde já se observa uma componente direcional de NE, é maior que 6,7m.s-1(13kt).

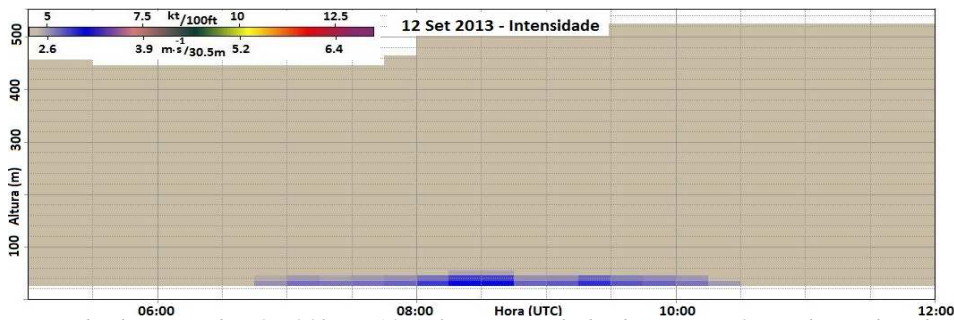


Figura 5: Tempo de duração das 07:00h às 10:15h e intensidade de WS, na faixa de moderada conforme os dados cujo maior índice foi às 08:45h a 30m com variação de 3,02 m.s-1/30m.

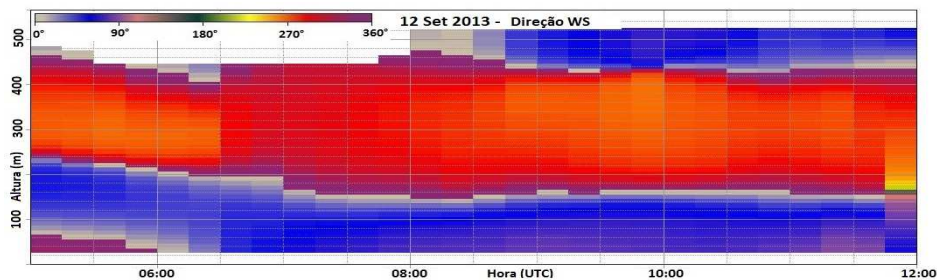


Figura 6: Variação da direção da WS mostra a faixa central no setor WNW (entre 270° e 300°) variando, acima e abaixo, para uma componente aproximadamente N e em verde, a medida que se distancia da faixa central, a direção muda para NE.

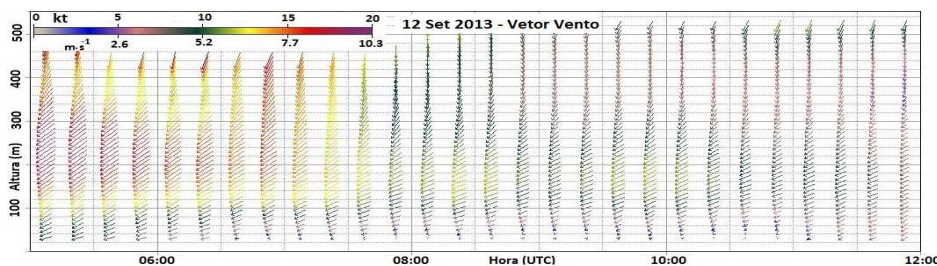


Figura 7: A figura mostra o perfil vertical do vento horizontal. Verifica-se vento NE entre 10kt e 15kt com componente direcional NE entre 100 m e 150 m. Às 07 UTC é detectado o fenômeno de WS, conforme Figura 5.

As informações de METAR durante todo o dia 12 de setembro de 2013 não apresentam WS, ou seja, não houve informe deste fenômeno por aeronaves em procedimento de pouso/decolagem; por consequência, não há registro no SISCOMET, ou seja, não aparece nas estatísticas. O vento máximo horizontal em superfície não ultrapassou 8kt (4,12 m.s-1).

O primeiro nível com informações do SODAR está a 30 m do solo (ou seja, 98,42ft), enquanto o vento de superfície do METAR é aferido na altura de 10m; portanto, há uma faixa entre 10m e 30m sem informações. No entanto, é clara a presença do fenômeno, com intensidade moderada, entre 0700UTC e 1015UTC.

4.Casos observados de cisalhamento do vento

Conforme explicado anteriormente, os casos foram subdivididos em função da medição da intensidade do cisalhamento do vento realizada pelo SODAR e considerando os valores apresentados na tabela 1. Cabe frisar que a subdivisão “leve” não foi considerada nas análises pelo fato de não ter havido informe de WS leve por parte dos pilotos extraídas do SISCOMET, característica esta que deve estar relacionada ao costume dos pilotos com baixos níveis de turbulência e que certamente representa um risco menor de acidente. Assim sendo, as subdivisões adotadas foram severo, forte e moderado, as quais ocorrem respectivamente em porcentagens inferiores a 2% dos casos, entre 6 e 12% e entre 86 e 92% (Gráfico 8).

A coleção de situações é extensa e pode se tornar bastante cansativa uma vez que as mesmas informações são utilizadas para a interpretação de cada caso. Desta forma, optou-se por padronizar a apresentação dos casos de maneira agrupada (severos, fortes e moderados) e em ordem cronológica de ocorrência por categoria. Deste ponto em diante, cada caso em cada subdivisão ocupa uma página, encontrando-se organizado sempre com as correspondentes imagens de satélite e radar (quando disponíveis), além das imprescindíveis observações do SODAR e de um pequeno texto comentando a situação em particular. Cada imagem possui suas informações individuais, assim como as medições do SODAR. Por uma questão de facilidade e de clareza, as figuras de cada caso não serão individualmente numeradas, sendo os mesmos referidos por sua severidade e data de ocorrência, quando for o caso, na sessão de Discussões e Conclusões. Todos os casos de severos estão apresentados, dada a quantidade restrita destas situações. Por sua vez, os casos de intensidade forte do ano de 2013 foram inseridos em sua totalidade, porém de intensidade moderada totalizam um número elevado que inviabiliza a apresentação de todos; desta forma, nestas categorias os casos foram selecionados de acordo com os meses do ano de 2013, acervo mais completo e contínuo, e/ou por suas especificidades.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Considerando a grande quantidade apresentada de resultados compilados (382 casos moderados, 47 fortes e 6 severos)²⁴, torna-se necessário discuti-los de forma única e organizada.

Do ponto de vista das situações meteorológicas com potencial de causar *windshear*, foi possível notar que a esmagadora maioria dos casos esteve associada à presença de convecção ou então a situações pré-frontais ou frontais sobre o aeródromo. Essas condições são notórias entre os observadores e pilotos, uma vez que instabilidades atmosféricas são comuns nestes casos, o que faz com que estes profissionais estejam, de certo modo, em alerta para situações de risco. Além destes, também ocorreram casos com a presença de complexos convectivos de mesoescala sobre a Região Sul do Brasil.

Em geral, estas situações relacionadas a casos severos e fortes de cisalhamento do vento ocorrem em função da intensificação do fluxo de componente norte sobre o Aeroporto de Guarulhos, o qual interage com a topografia da Serra da Cantareira originando o fenômeno.

No entanto, casos de *windshear* com intensidade forte e moderada podem ocorrer em situações não necessariamente associadas a condições frontais ou pré-frontais. Foram detectadas inúmeras situações pós-frontais em que o vento gira de SE para NE à medida que a altura aumenta, como o dia 7 de julho de 2013, ou com predomínio de SE em todos níveis, caso de 13 de abril de 2013, e isso pode produzir um evento de *windshear* independentemente da interação com a orografia dos arredores. Estes casos distinguem-se dos eventos severos e fortes mencionados no parágrafo anterior, pois os profissionais envolvidos não necessariamente estão com grau elevado de atenção quando comparado com as situações evidentemente instáveis.

Outro ponto relevante diz respeito à intensidade do vento de superfície, pois a intensidade do cisalhamento independe do escoamento superficial apenas. Além disto, detectaram-se casos moderados apesar de intensidades inferiores a 16kt ($\sim 8.23 \text{ m.s}^{-1}$) em todo perfil do vento. Isso faz com que as medições diretas pelo SODAR sejam cruciais e imprescindíveis para o monitoramento deste tipo de situação.

É relevante identificar o padrão que, em muitos casos, apresenta uma faixa central com direção do cisalhamento de NW, acima de 100m de altura que auxilia a previsão de WS em até 2 horas de antecedência. Convencionou-se neste trabalho chamar tal faixa de tubulação ou tubo, em função de sua aparência nos gráficos. Há uma característica padrão em que este “tubo” se estabelece:

- geralmente entre 100m e 300m de altura;
- gera WS abaixo de 100m, que em muitos casos permanece por horas, perdurando durante a maior parte do tempo em que exista esta forma de tubulação;
- no perfil vertical dos ventos é comum as velocidades não ultrapassarem 15kt em casos moderados e 20kt nos casos fortes;
- a direção dos ventos possuem um discreto giro horário no sentido para o solo;

- em muitos casos havia um sistema convectivo no sul do país, enquanto no estado de São Paulo não há atividade convectiva.

Conforme citado nas descrições anteriores, na maior parte dos casos este tubo forma-se entre 1 e 2 horas antes do primeiro sinal de WS, aproximadamente. Não foram detectados casos em que houve este tubo e pelo menos três dos tópicos acima não tenham sido identificados. É importante salientar a ausência deste tubo para situações de intensidade severa.

Através das informações comparadas entre SODAR e SISCOMET, mesmo em um curto período do tempo, conclui-se que o fenômeno estudado sempre foi subestimado em quantidade e pouco conhecido em relação à sua intensidade. Vale salientar a identificação da frequência diária de passageiros por aeronave com relação à porcentagem de fenômeno nos quatro períodos do dia.

6. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A falta de equipamentos mais sofisticados nos aeroportos brasileiros, como LLWAS que mensura a média do vento em superfície – direção e velocidade – e RADAR Doppler, ambos presentes em alguns dos grandes aeroportos do mundo como nos Estados Unidos e Alemanha, para melhorar a análise e a prevenção de acidentes é um fator a ser considerado para o futuro aeroportuário no país, uma vez que o SODAR é sensível a interferências externas como temperatura, umidade/precipitação e som externo os quais podem atenuar o sinal a tal ponto de acarretar na perda total, conforme identificados em alguns casos já apresentados.

Aeroportos que têm como auxílio um Radar Doppler, são capazes de identificar e alertar órgãos de controle de tráfego aéreo (ATC) de uma iminente *microburst*, por exemplo. O aeroporto da cidade de Nova York (sigla ICAO: KJFK) possui LLWAS que alerta ao órgão ATC, isto possibilita à Torre de Controle (TWR) informar às aeronaves, antes mesmo delas atingirem a área aeroportuária, possibilitando cancelar o pouso, cujo termo aeronáutico é arremeter a aeronave, e evitar um propenso acidente. Por fim, ao término do alerta, as aeronaves podem retornar ao procedimento anterior e aterrissar com maior segurança. Tal procedimento proveniente desse equipamento ainda não é uma realidade em nosso país. No entanto, com treinamento dos profissionais de controle de tráfego aéreo e meteorologia e aperfeiçoamento do uso do SODAR também em Torres de Controle, é possível diminuir o risco de acidentes.

Como a cada ano há mais dados de SODAR, sugere-se para trabalhos futuros uma análise de um período de tempo maior. Outro ponto relevante para ser examinado é a inserção deste perfil de vento em simulações numéricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASIAS, *Federal Aviation Administration (FAA)*. Weather-related Aviation Accident Study 2003–2007. Fev 2010. Disponível em <<http://www.asias.faa.gov>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

BOLETIM DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE METEOROLOGIA. *A Meteorologia e a Aeronáutica*, vol.29, nº3, nov. 2005. Disponível em: <<http://www.sbmet.org.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

BEAUDETTE, D.C., *Advisory Circular, U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), AC00-54*, p.1-56, nov. 88. Disponível em: <http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/22291>. Acesso em: 27 dez. 2013.

BRASIL., INFRAERO Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. *Anuário Estatístico Operacional 2012*. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatisticas/estatisticas.html>> Acesso em : 15 mar. 2014.

BRASIL., DECEA Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2015*. Disponível em: <http://www.cgna.gov.br/wp-content/themes/cgna/documentos/do/anuarios/anuario_2015.pdf> Acesso em : 10 jan. 2017

CERQUEIRA F.S. et al. Ameaça à Aviação. *Revista CFOE*. p. 94. 2005. Disponível em <http://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2014/04/ameaca_a_aviacao.pdf>. Acesso em : 20 fev. 2015.

COULTER R.L. and Kallistratova M. A., Two decades of progress in SODAR techniques: a review of 11 ISARS proceedings, 2003.

LITTLE C.G., Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere. *PROCEEDING OF THE IEEE*. VOL. 57. Nº. 4 , APRIL, p.571-578. , april,1969.

LIMA, R.S. Correlação de Vento de Rajadas com Variáveis de Superfície. INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO – ICEA, p.21, jun.2008 Disponível em: < http://www.redemet.aer.mil.br/Artigos/rajada_sup_sbgr.pdf >. Acesso em: 02 fev. 2015.

FOGACCIA, C.V.C. Análise de eventos de turbulência e cisalhamento do vento na área do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. 2001. IV f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento De Ciências Atmosféricas Instituto Astronômico e Geofísico Universidade De São Paulo, 2001.

FUJITA, T.T.; CARRACENA, F. An analysis of three weather-related aircraft accidents. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, v. 58, p. 1164-1181. 1977.

MANUAL ICAO: On Low-level Wind Shear, Doc 9817 AN/449, First edition, 2005.

HARRIS C.M., Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, p.157, Feb, 1966. Disponível em: < <https://ccrma.stanford.edu/~jos/HarrisJASA66.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

FCA 105-3/2015 - Instalação de Estações Meteorológicas de Superfície e de Altitude. Disponível em < <http://www.redemet.aer.mil.br> >. Acesso em 25 ago.2015.

MATSCHINSKE, M.R.; FREITAS, J.C. de. *Departamento de Controle do Espaço Aéreo- DECEA, Subdepartamento de Operações, windshear. 2012*. Disponível em < <http://www.redemet.aer.mil.br> >. Acesso em : 12 fev. 2014.

NASDAC, FAA Office of System Safety. *Review of Aviation Accidents Involving Weather Turbulence in the United States 1992 –2001*. Aug. 2004, [Reference Number: 04-551], Disponível em < www.nasdac.faa.gov>. Acesso em 11 nov.2015.

SILVA, W.L; ALBUQUERQUE, F.; CARELLI J. *Curso ministrado na INFRAERO, dezembro de 2013*.

SITE MASTER. Disponível em: < www.master.iag.usp.br/ >. Acesso em: 02 fev. 2015.

SITE AVIÕES E MÚSICAS. Disponível em: < <http://www.avioesemusicas.com/> >. Acesso em 20 nov. 2014.

SITE REDEMETS. Disponível em: < <http://www.redemet.intraer/windshear.php> >. Acesso em: 06 jan. 2014.

SITE Scintec. Disponível em: < http://www.scintec.com/english/CustomUpload/3740357034003700356036903500340036503600373035603690370037203640/MFAS_2012.pdf >. Acesso em 15 abr. 2014.

SITE SmartCockpit. Disponível em: < <http://www.smartcockpit.com/> >. Acesso em: 12 jan. 2014.

SITE University of Notre Dame. Disponível em: < <http://www3.nd.edu/~dynamics/efd/sodar.html>>. Acesso em: 06 jan. 2014.

SITE University of Salford Manchester. Disponível em: . Acesso em: 06 jan. 2014.

Scintec Flat Array Sodar – Hardware Manual Version 1.01.Ed. 2012. Disponível em: < <http://www.scintec.com/english/web/Scintec/> > Acesso em: jan.2014.

Scintec Flat Array Sodar - Software Manual APRun. version 1.22. october, 2010. Disponível em: < <http://www.scintec.com/english/web/Scintec/>> Acesso em: jan.2014.

SOUZA, Cleber Afonso de. *ASPECTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DO JATO EM BAIXOS NÍVEIS NA AMÉRICA DO SUL - REANÁLISE NCEP/NCAR E SIMULAÇÃO COM O MCGA CPTEC/COLA*. 2010. 36 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 2010. Disponível em: < <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/05.17.11.24/doc/publicacao.pdf> >. Acesso em: 15 mar. 2014.

VILLELA, R.J. *Fique longe dos Cbs. Aeromagazine*, ano 8, n. 87, p. 32-34. 2001.

VILLELA, R.J. *Fator surpresa – O acidente de Kano, na Nigéria, foi o precursor da investigação sobre os efeitos do wind shear nas fases de aproximação e decolagem*. *Aeromagazine*, ano 9, n. 99, p. 26-27. 2002.