



Instituto de Controle do Espaço Aéreo

Divisão de Pesquisa

Relatório contendo informações sobre o pré-processamento dos dados,
desenvolvimento e desempenho dos modelos


Palavras-chave: SBRJ, Perfilador, Vento, Meteorologia, Algoritmo,
Desempenho

Elaborado por:

Eliana Yuri Shiino e Alice Macedo

Seção de Meteorologia Aeronáutica – PPMA

Aprovado por:

Documento assinado digitalmente
 MARIO PAULO ALVES JUNIOR
Data: 07/02/2024 12:20:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mario Paulo Alves Junior – Maj Esp MET

Chefe da Divisão de Pesquisa

Dezembro de 2023



Resumo

Este documento apresenta o estudo sobre previsão de direção e velocidade do vento, utilizando aprendizagem de máquina (*machine learning*), focado em decisão de cabeceira para pouso e decolagem de aeronaves no aeroporto Santos Dumont (SBRJ). Um estudo sobre a parte meteorológica, vento na aviação e equipamentos, encontra-se em Apêndice. Os resultados utilizando machine learning mostraram que a aplicação para previsão de 15 minutos à frente, apresentou melhor resultado do que a aplicação para previsão de 30 minutos à frente. A melhor RMSE para a modelagem de velocidade do vento foi 0,7659 e para direção do vento foi 70,07. Para trabalhos futuros, necessita-se de uma série dados mais longa e consistente, e que um equipamento colete informações da superfície até 500 metros de altura.



1 Introdução

Utilizando-se dados de vento obtidos de um equipamento SODAR, instalado no aeroporto Santos Dumont (SBTJ), aplicou-se metodologia de previsão de vento para cabeceira, utilizando aprendizagem de máquina (*machine learning*).

Os dados utilizados neste trabalho possuem características de uma série temporal, com medidas com intervalo de 15 minutos. Observou-se que possuem variações importantes, não determinísticas e também que se faz necessária a análise e a coleta dos dados por um tempo suficientemente longo para identificar fatores como ciclo diário, sazonalidade e variabilidade climática.

Um dos fatores que determinaram a utilização de Redes Neurais foi devido à sua estrutura para lidar com dados sequenciais. As Redes Neurais Artificiais podem ser utilizadas para previsão de séries temporais pela natureza adaptativa e capacidade de aprendizagem baseadas em conhecimentos prévios.

A biblioteca utilizada foi a TensorFlow, de código aberto, criada para aprendizado de máquina, computação numérica e outras tarefas entre elas o treinamento de redes neurais.

Os dados foram divididos em três conjuntos de dados: 70% para treinamento, 20% para validação e 10% para teste.

O desempenho do algoritmo não foi melhor normalizando os dados. Para o modelo final foram utilizados os dados originais exceto os parâmetros de direção do vento e direção de *windshear* que tiveram os valores convertidos para radiano devido à diferença em magnitude entre estes dados e os demais parâmetros.

2 Pré-processamento dos dados

2.1 Eliminação de atributos

Dos parâmetros disponibilizados pelo equipamento, os utilizados para o treinamento do algoritmo foram: *speed* (velocidade), direção (direção do vento), *shear* (*Windshear*), *sheardir* (direção do *Windshear*), *ti* (turbulência), *u* (componente u do vento), *v* (componente v do vento) e *w* (componente w do vento).



A velocidade do vento é importante para que se possa definir os períodos em que o vento é maior que o limiar de 6 m/s, possibilitando elaborar alerta sobre a necessidade de mudança de cabeceira para pouso e decolagem de aeronaves.

A direção do vento, ou suas componentes combinadas u e v, associado à velocidade, é importante para definição da cabeceira para pouso e decolagem das aeronaves. O pouso e a decolagem de aeronaves devem ocorrer no sentido contrário à direção do vento.

O windshear, direção do windshear e turbulência, são importantes pois podem causar variações bruscas na sustentação da aeronave. O windshear, ocorre pela variação das componentes horizontais (u e v) ou da componente vertical (w) do vento, tornando estas componentes parâmetros relevantes de serem analisados no contexto deste estudo.

Informações mais detalhadas sobre o vento e o windshear na aviação e suas causas meteorológicas, podem ser encontradas no Apêndice.

2.2 Amostragem dos dados

A fase inicial deste estudo contemplou a análise de dados dos anos de 2017, 2018 e 2019, obtidas por um equipamento SODAR, instalado no aeroporto Santos Dumont (SBRJ).

Optou-se por utilizar os dados do ano de 2018, pois contêm uma quantidade menor de registros com erros e maior continuidade de dados (menor número de dados ausentes) em relação aos anos de 2017 e 2019 (Figura 1).

Conforme orientação inicial do especialista, a continuidade do trabalho ocorreu utilizando as informações do nível de 30 metros.

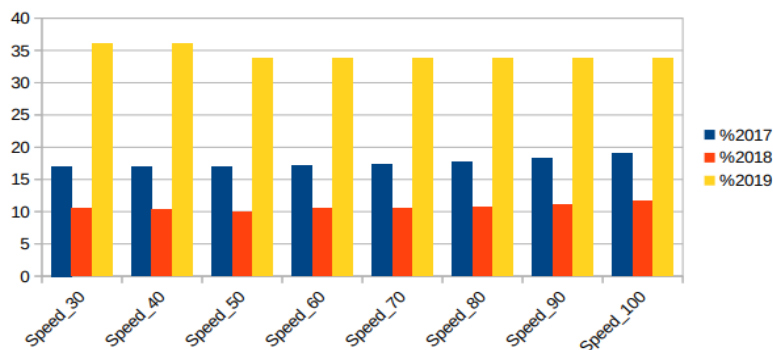


Figura 1- Porcentagem de dados nulos e com erros



A Figura 2 mostra que maior parte dos dados em 30 metros, estão com intervalos de 15 minutos entre eles, 16,9% dos dados estão com intervalo superior a 30 minutos.

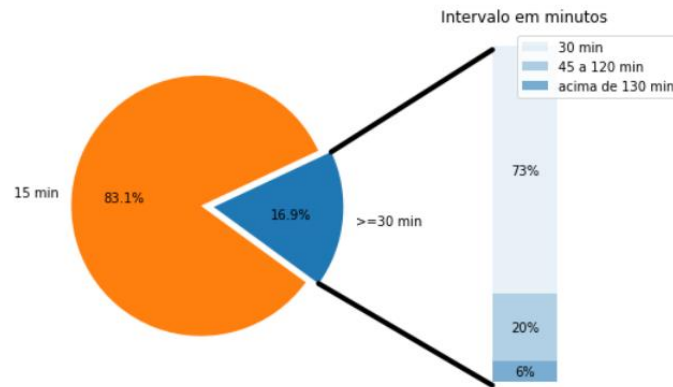


Figura 2 - Porcentagem do intervalo temporal dos dados em 2018

Mais detalhes da análise exploratória destes dados, podem ser obtidos nos documentos elaborados previamente: Análise exploratória – Fase 1 e Análise exploratória – Fase 2.

2.3 Limpeza dos dados

O manual do equipamento SODAR (Scintec Ag., 2013), informa que todos os valores de dados que não passam nas verificações de controle de qualidade do equipamento, são automaticamente desvalidados e é atribuído o valor de erro: 99,999. Os registros que continham os valores de erro na amostra utilizada neste estudo, foram excluídos da base de treinamento.

Devido a grande quantidade de dados de vento ausentes e com erros, optou-se por não utilizar as técnicas de *imputação* nesta base de dados. A técnica de *imputação* é utilizada para substituir os dados ausentes por algum valor substituto, para reter a maioria das informações do conjunto de dados. No caso do vento, por ser um fluido com escoamento turbulento na camada limite planetária, somado a quantidade de dados ausentes da presente base de dados, a aplicação desta técnica de *imputação* seria ineficiente.

O escoamento turbulento é a condição irregular, na qual o fluido apresenta variação aleatória no tempo e no espaço. O vento na camada limite planetária apresenta escoamento turbulento, o que, diferentemente da precipitação e temperatura por exemplo, não facilita o preenchimento de suas falhas.



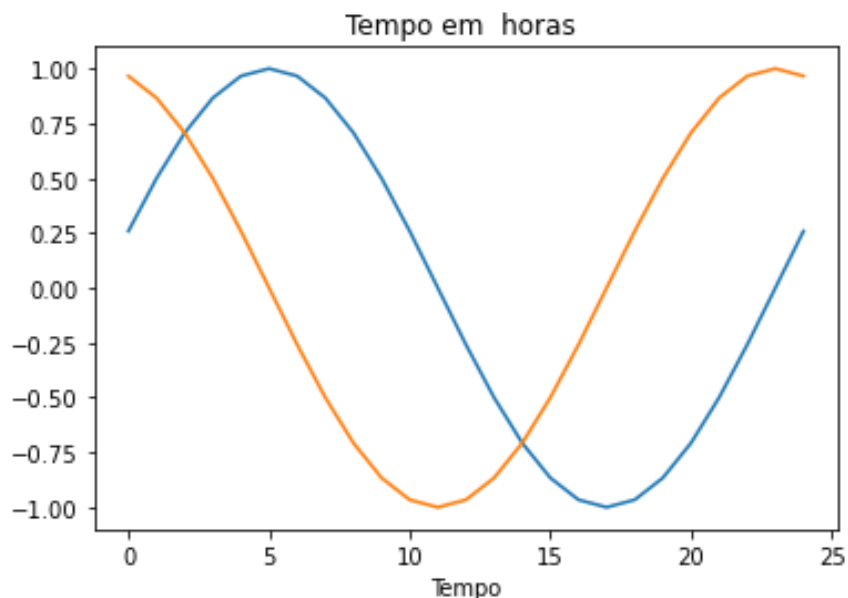
O dado de windshear foi excluído da continuidade do estudo devido a amostra apresentar muitos valores acima do limiar considerado Extremo (REDEMET, 2016). Ver parte da amostra na coluna shear_30, da tabela 1.

Intensidade do windshear	m/s/m = 1/s
Leve	0 a 0,068
Moderado	0,084 a 0,135
Severo	0,152 a 0,203
Extremo	> 0,204

Fonte: <http://redemet.decea.mil.br/old/?i=facilidades&p=windshear>
Acessado em outubro de 2023.

2.4 Transformação dos dados

Os dados coletados possuem periodicidade horária. Para que os algoritmos consigam lidar com esta periodicidade, o parâmetro data/hora foi transformado em sinais (transformações de seno e cosseno).



2.5 Redução de dimensionalidade

A base de dados do perfilador de vento contém um total de 46 colunas de dados (número de atributos). Através da consultoria dos especialistas a base de dados utilizada foi de 9 colunas. A Tabela 1 apresenta uma amostra dos dados utilizada para o treinamento do modelo.



data_hora	speed_30	direcao_30	shear_30	sheardir_30	ti_30	u_30	v_30	w_30
2018-01-01 00:15:00	0.93	357.4	11	144.0	0.32	0.04	-0.93	0.13
2018-01-01 00:30:00	1.04	26.9	7	170.8	0.17	-0.47	-0.93	-0.01
2018-01-01 00:45:00	1.23	13.4	9	245.4	0.16	-0.29	-1.19	0.07
2018-01-01 01:00:00	1.65	341.9	15	225.0	0.15	0.51	-1.57	0.19
2018-01-01 01:15:00	1.91	351.0	15	218.3	0.08	0.3	-1.89	0.0
2018-01-01 01:30:00	1.05	344.7	16	229.6	0.17	0.28	-1.01	0.13
2018-01-01 01:45:00	0.09	269.8	17	233.9	0.63	0.09	0.0	-0.02
2018-01-01 02:00:00	0.66	170.5	12	208.2	0.68	-0.11	0.65	0.0
2018-01-01 02:15:00	0.54	221.0	13	176.1	1.02	0.36	0.41	0.1
2018-01-01 02:30:00	0.81	47.4	0.01	76.1	0.91	-0.59	-0.55	0.08
2018-01-01 02:45:00	0.52	29.7	11	60.5	0.73	-0.26	-0.45	0.04
2018-01-01 03:00:00	1.78	351.8	12	50.6	0.46	0.25	-1.77	0.17
2018-01-01 03:15:00	1.06	23.0	6	352.0	0.46	-0.42	-0.98	0.02
2018-01-01 03:30:00	3.28	4.8	17	36.9	0.35	-0.27	-3.26	0.05
2018-01-01 03:45:00	2.63	0.6	19	308.4	0.35	-0.03	-2.63	0.02
2018-01-01 04:00:00	1.7	359.1	22	300.3	0.46	0.03	-1.7	0.04
2018-01-01 04:15:00	1.94	3.9	12	44.7	0.46	-0.13	-1.94	0.02
2018-01-01 04:30:00	1.35	349.3	23	32.5	0.48	0.25	-1.33	0.01
2018-01-01 04:45:00	0.85	330.2	24	44.3	0.31	0.42	-0.74	-0.11
2018-01-01 05:00:00	1.5	345.5	12	26.9	0.27	0.38	-1.45	0.05
2018-01-01 05:15:00	1.64	327.9	7	296.9	0.29	0.87	-1.39	0.05
2018-01-01 05:30:00	1.19	353.4	19	257.1	0.38	0.14	-1.18	0.09

Tabela 1

3 Treinamento dos modelos

Os modelos foram treinados para realizar previsões com base em uma janela de amostras consecutivas de dados. Foi configurado o algoritmo AdamW para otimização, que é um método estocástico de descida de gradiente baseado na estimativa adaptativa de momentos de primeira e segunda ordem. Optou-se pelo uso do AdamW pela sua eficiência com problemas envolvendo muitos dados e parâmetros.

A métrica de avaliação utilizada foi o RMSE (*Root Mean Squared Error*) que calcula a raiz quadrada do erro médio quadrático entre os valores reais e as previsões.

Para a métrica de perda foi utilizado o MSE (*Mean Squared Error*) com o objetivo de treinar o modelo (para cálculo do gradiente) sem a necessidade de interpretar as unidades de erro.

3.1 Modelos com previsão de um parâmetro para 1 intervalo de tempo (15 minutos)

Os modelos utilizaram 5 intervalos de tempo como entrada para prever 1 intervalo de tempo à frente (15 minutos).



(a) **Multicamadas**

Este modelo utiliza uma camada Flatten para serializar as entradas e duas camadas densas, com função de ativação 'relu'. O gráfico 1 ilustra uma amostra de exemplos das previsões de velocidade do vento e o gráfico 2 as previsões de direção do vento realizadas pelo modelo Multicamadas.

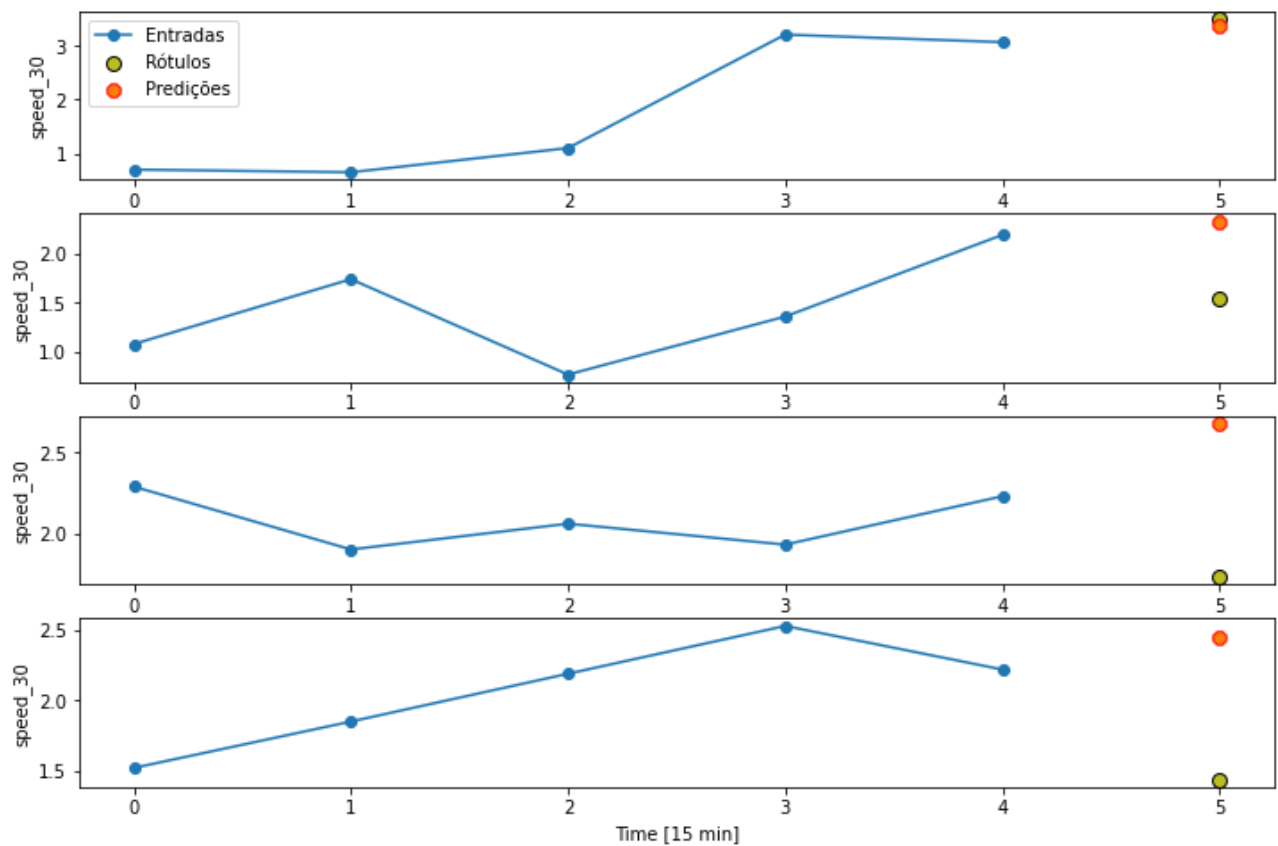


Gráfico 1

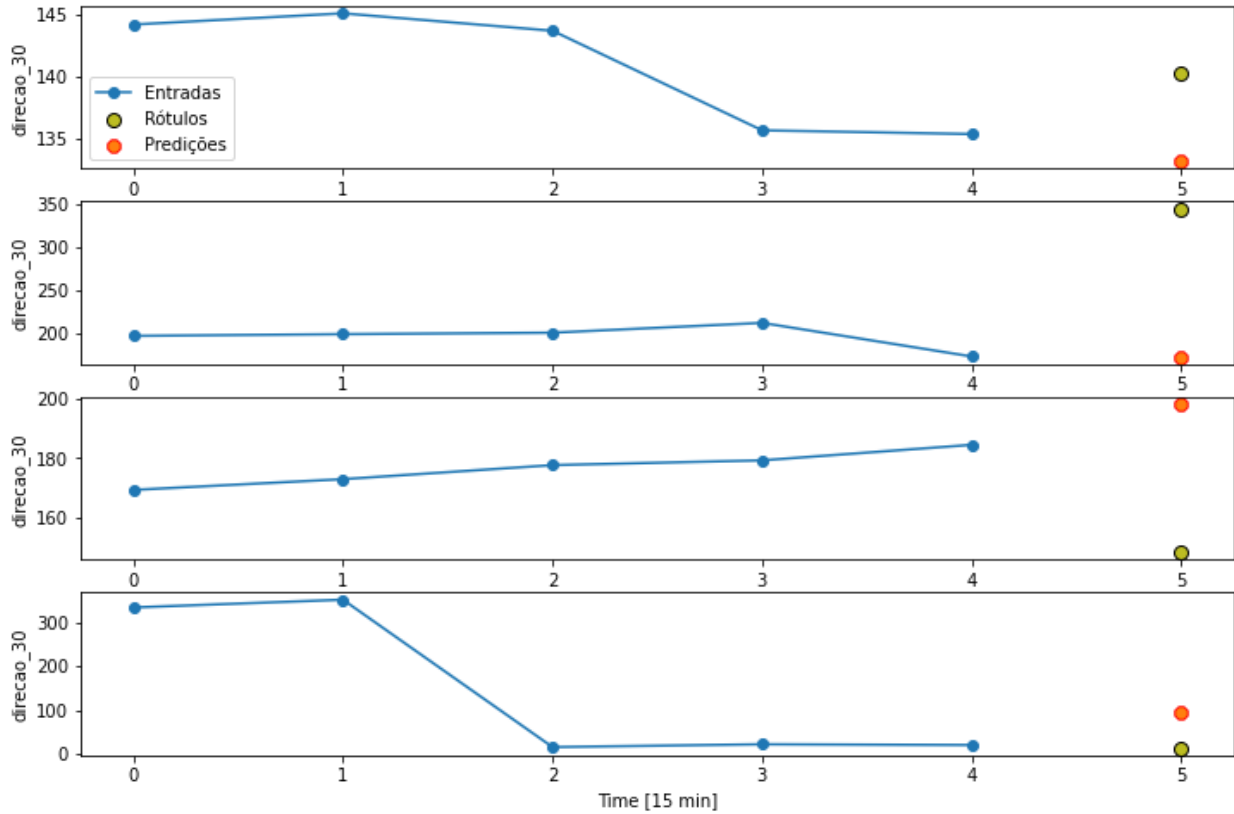


Gráfico 2

(b) CNN (Convolution Neural Network)

Este modelo consegue ver como os recursos de entrada mudam com o tempo, ele tem acesso a vários intervalos de tempo para realizar as previsões.

Para o treinamento deste modelo foram utilizadas uma camada Convolutiva de uma dimensão e duas camadas densas de 32 unidades (32 neurônios) com função de ativação 'relu' e 'LeakyReLU'. Os gráficos 3 e 4 ilustram uma amostra das previsões realizadas por este modelo.

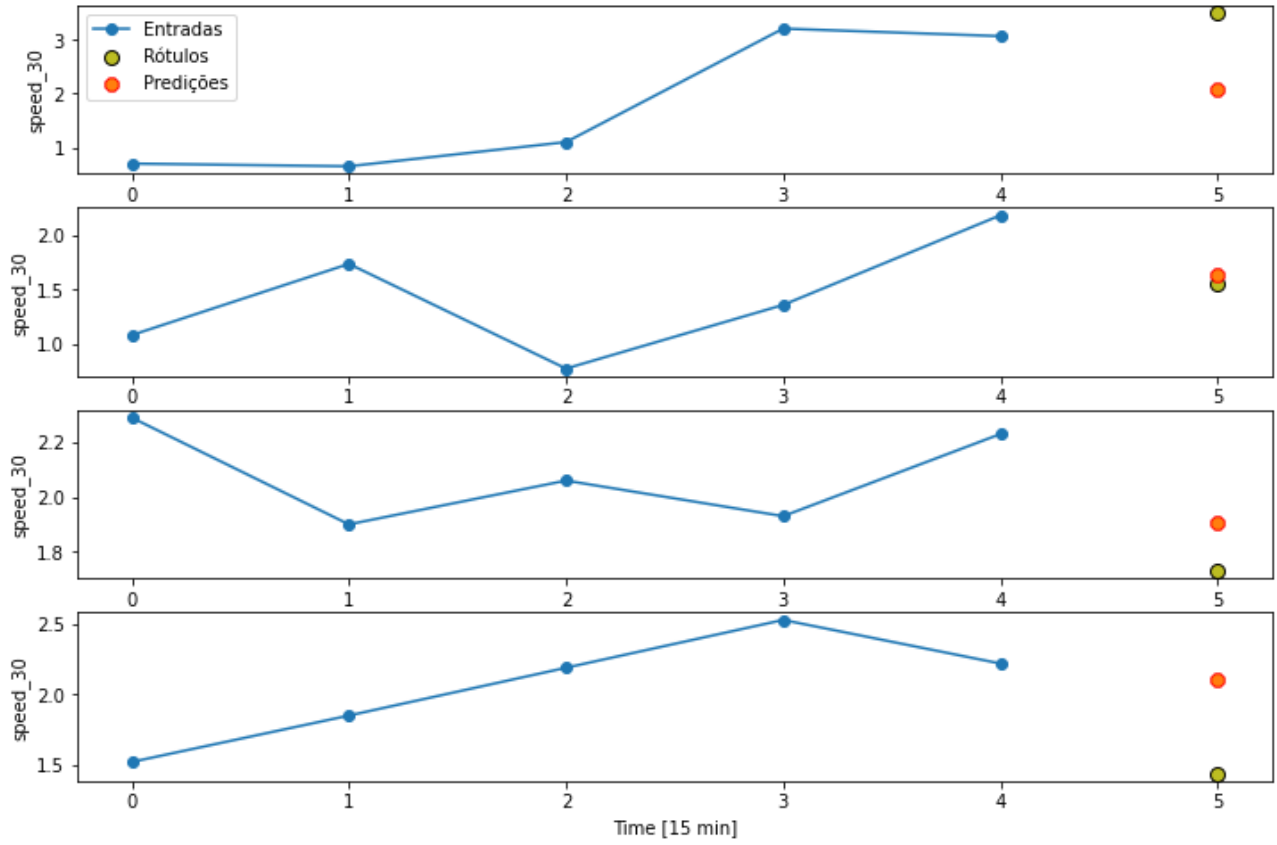


Gráfico 3

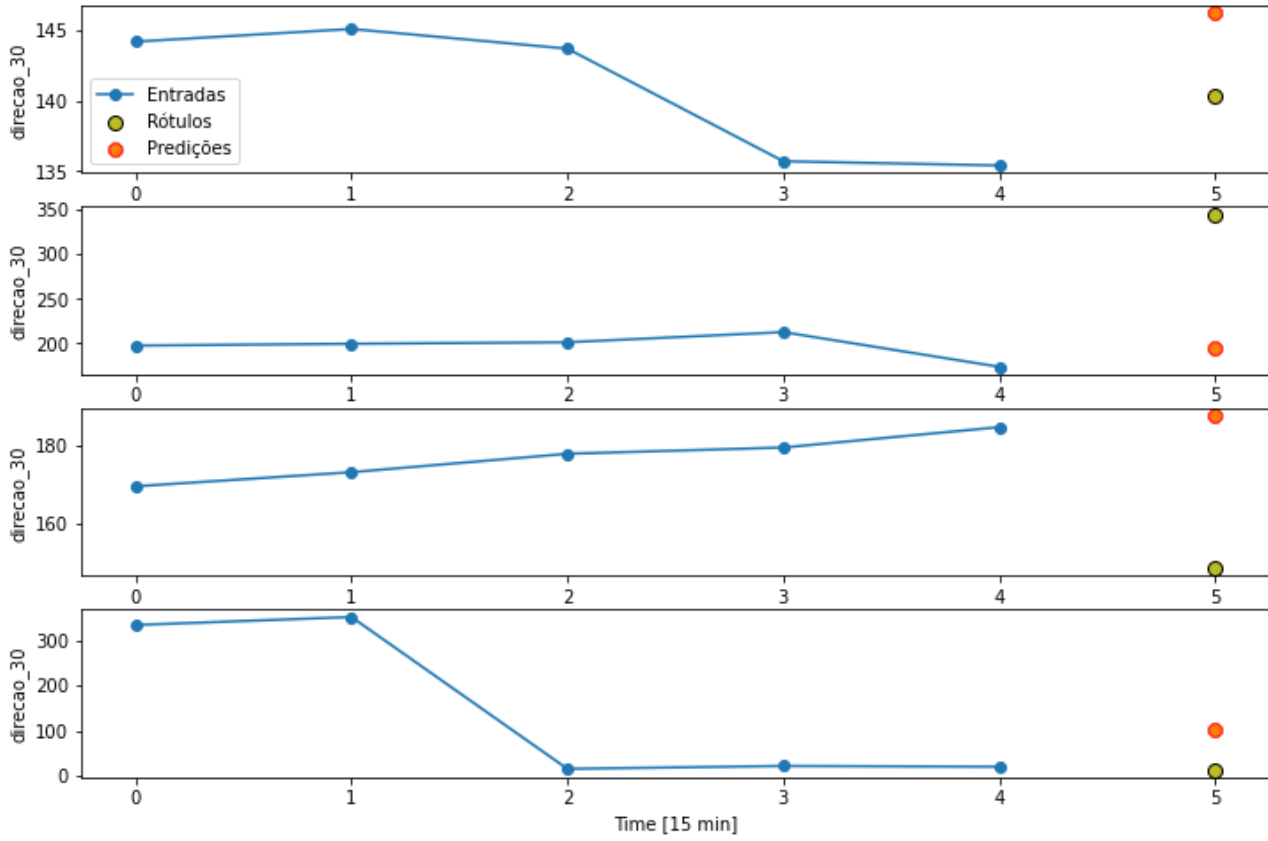


Gráfico 4



(c) RNN – LSTM (Recent Neural Network – Long Short -Term Memory)

As RNNs processam uma série temporal passo a passo, mantendo o estado interno a cada passo executado. Para este modelo se utilizou uma camada LSTM de 32 unidades. Os gráficos 5 e 6 ilustram um exemplo das previsões realizadas (velocidade e direção do vento).

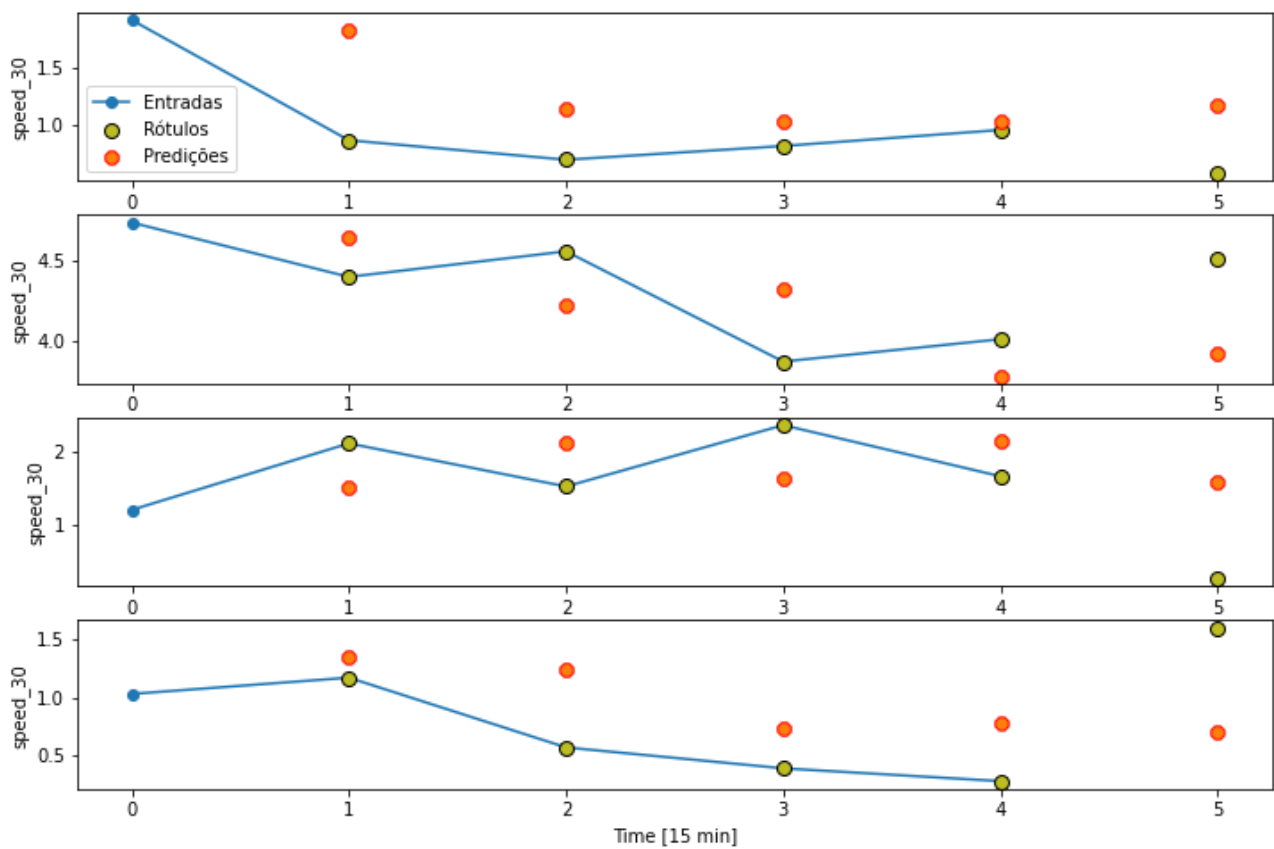


Gráfico 5

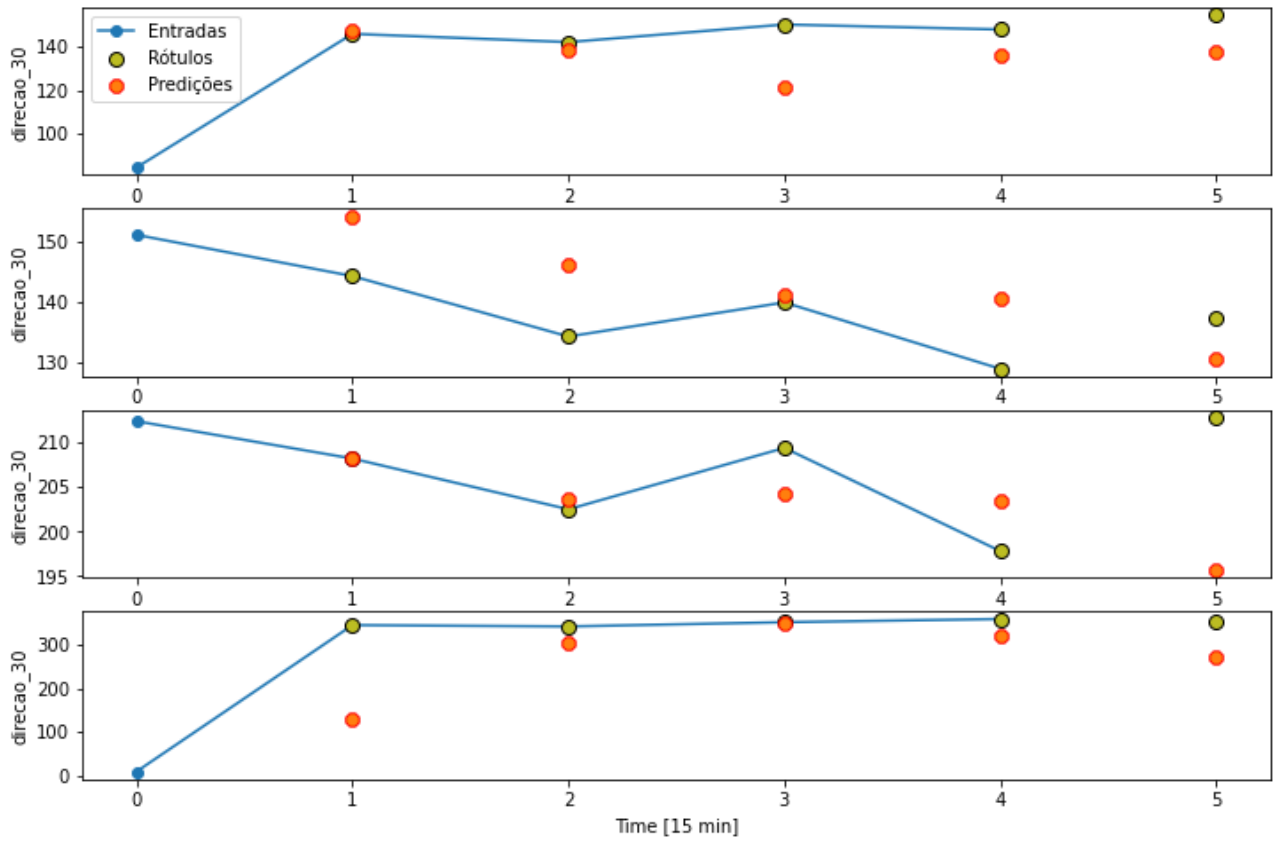


Gráfico 6



O desempenho dos modelos está representado nos gráficos 7 e 8:

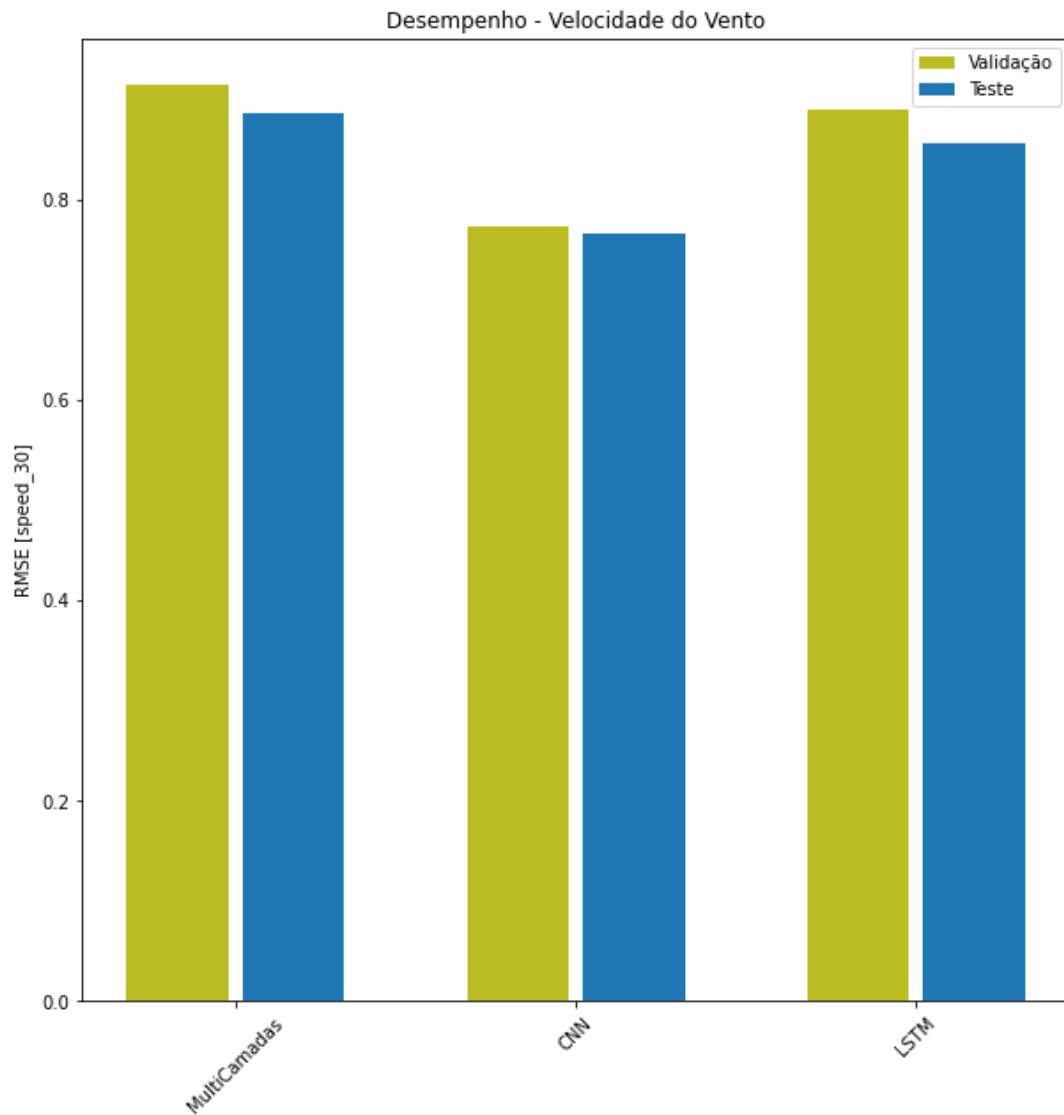


Gráfico 7

MultiCamadas: 0,8857

CNN: 0,7659

LSTM: 0,8568

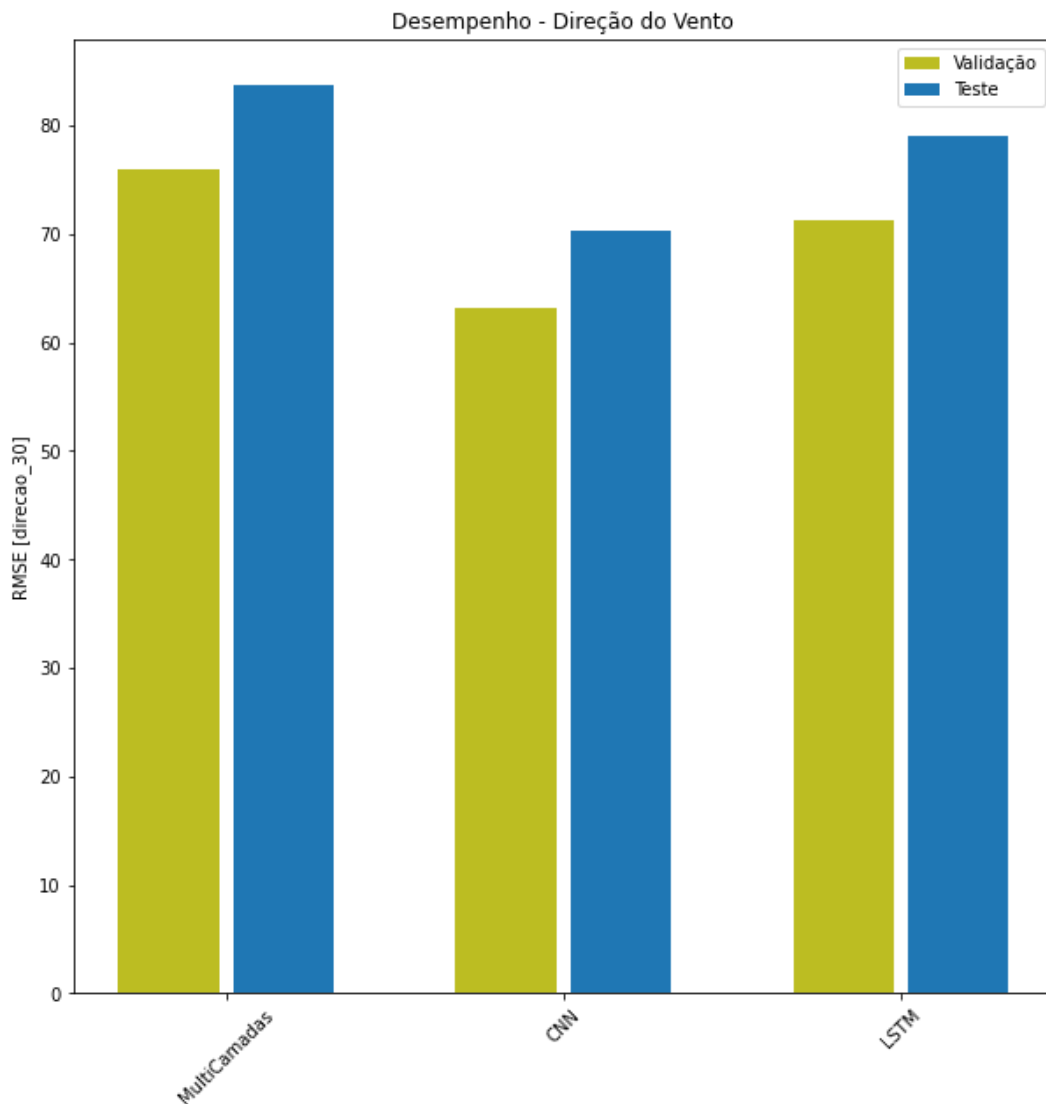


Gráfico 8

O modelo CNN também teve o melhor desempenho para a previsão de direção do vento. Os valores de desempenho dos testes foram:

MultiCamadas: 85,20

CNN: 70,07

LSTM: 79,74

3.2 Modelos de previsão de um parâmetro para 2 intervalos de tempo (30 minutos)

Para este caso os modelos foram configurados para aprenderem a prever uma sequência de valores futuros. Os modelos utilizaram 5 intervalos de tempo como entrada para prever 2 intervalos de tempo no futuro (30 minutos).



(a) **Multicamadas**

Este modelo faz a previsão da sequência inteira em uma única etapa. O gráfico 9 ilustra uma amostra de exemplos das previsões de velocidade do vento e o gráfico 10 as previsões de direção do vento realizadas pelo modelo Multicamadas para uma previsão de 30 minutos:

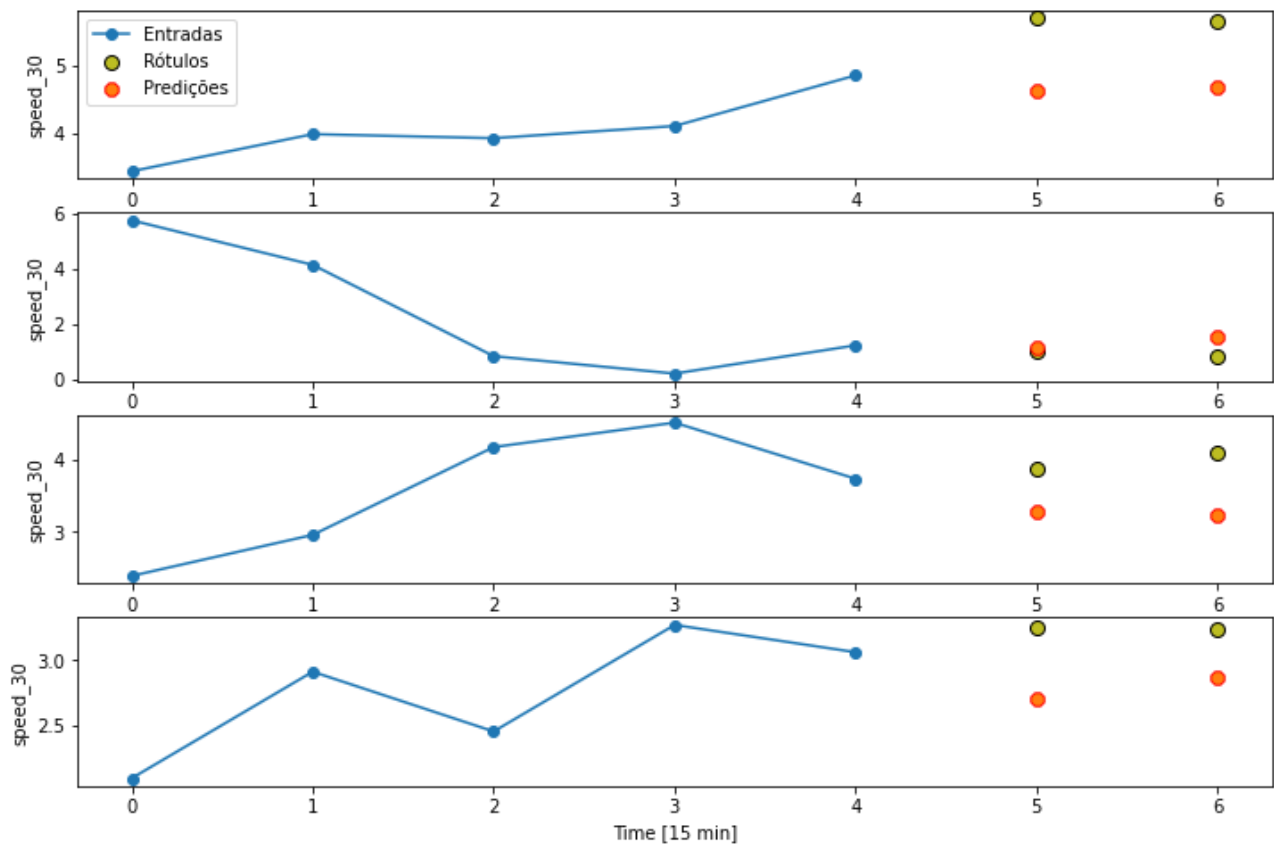


Gráfico 9

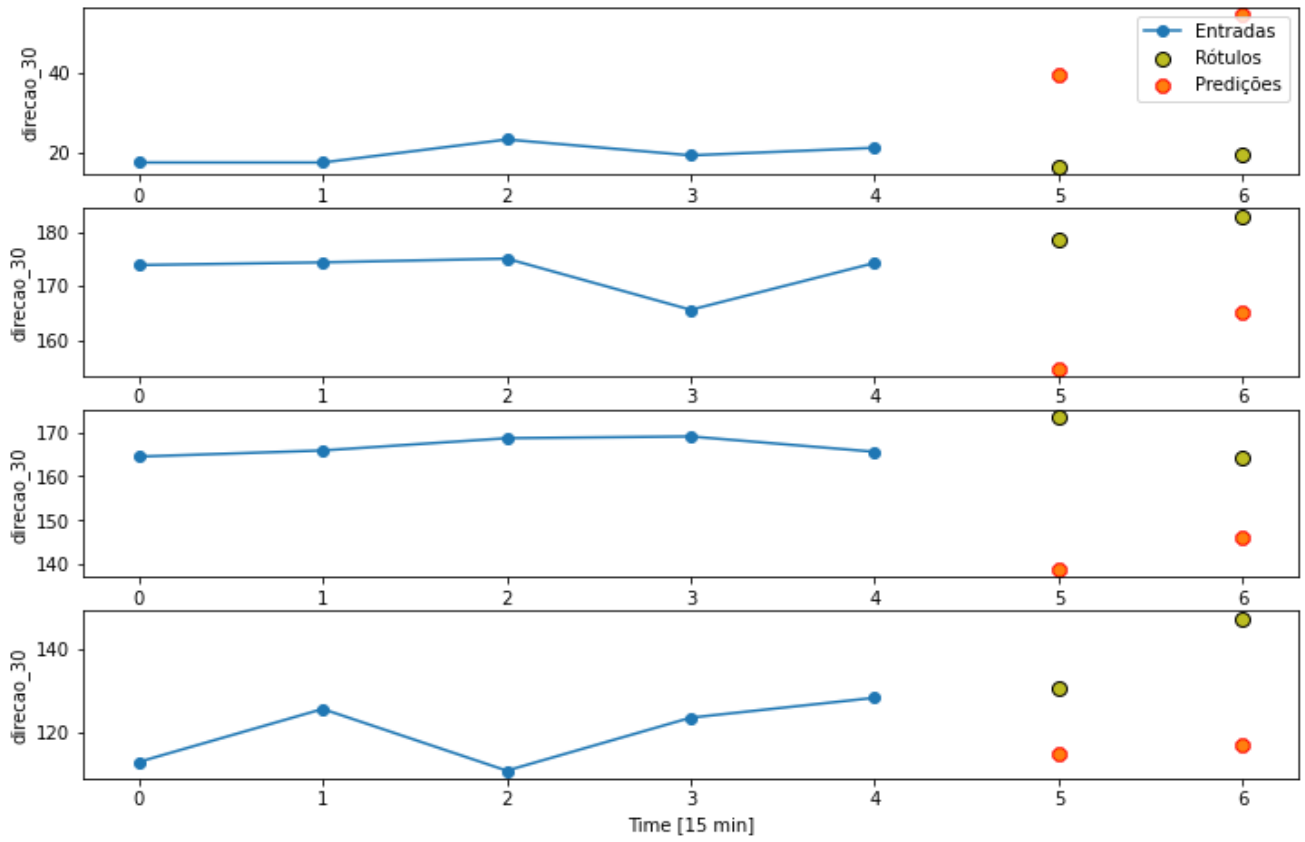


Gráfico 10



(b) CNN (Convolution Neural Network)

O modelo CNN realiza as previsões com base em um histórico de largura fixa (neste caso 5 intervalos de 15 minutos/5 entradas consecutivas de dados), para que o modelo possa ver como as variáveis mudam ao longo do tempo. Os gráficos 11 e 12 ilustram uma amostra das previsões realizadas por este modelo:

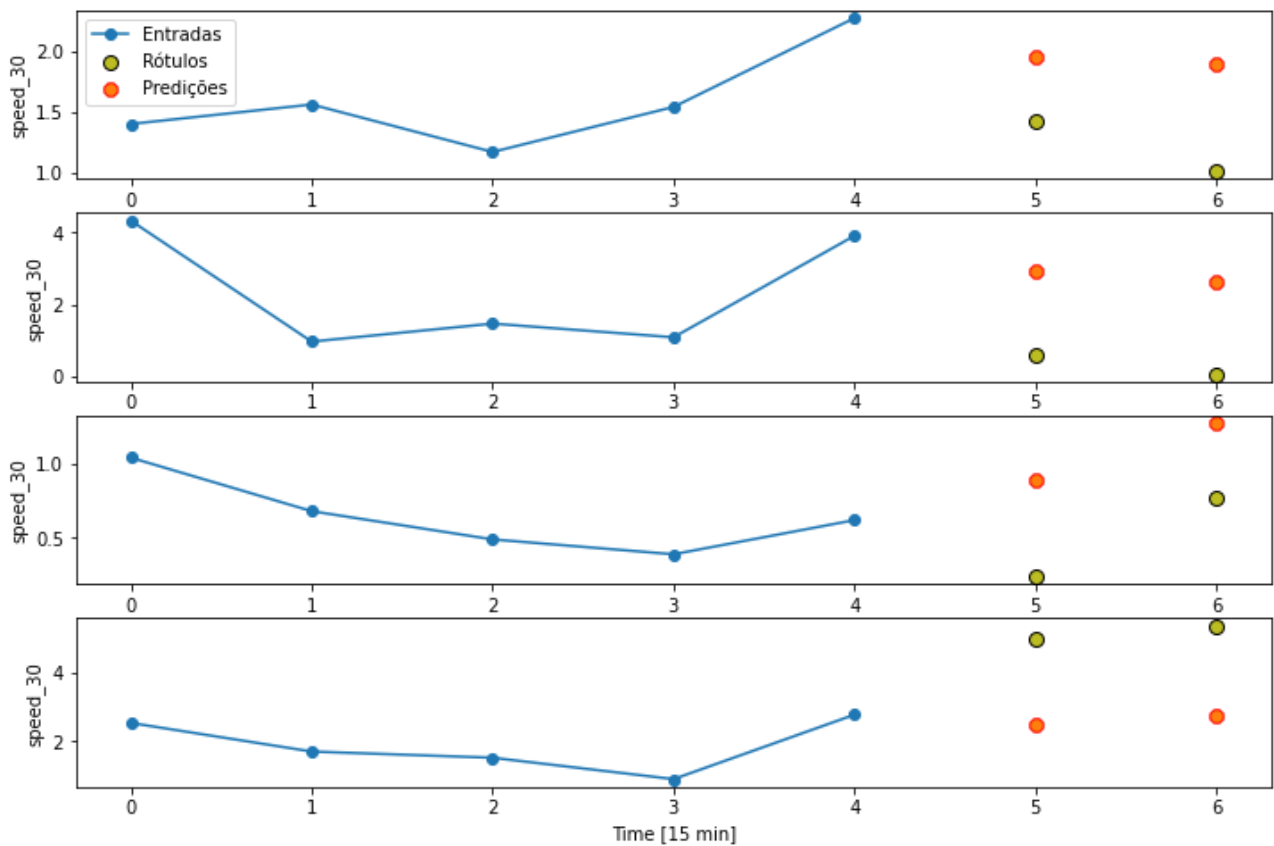


Gráfico 11

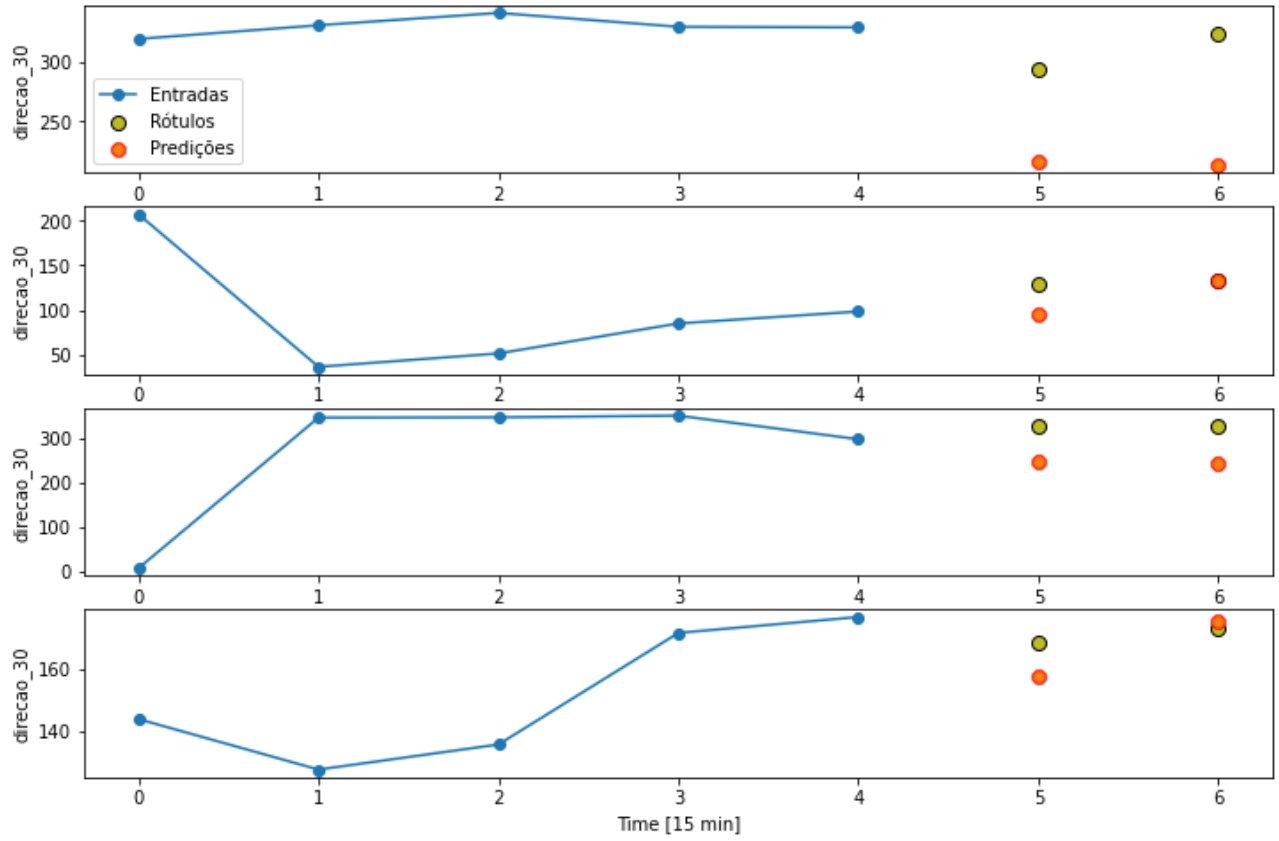


Gráfico 12



(c) **RNN – LSTM (Recurrent Neural Network – Long Short-Term Memory)**

O modelo recorrente aprende utilizando um histórico de entradas e acumula o estado interno por 5 intervalos de tempo (entrada consecutiva de dados) antes de realizar uma única previsão para o próximo intervalo. Os gráficos 13 e 14 ilustram um exemplo das previsões realizadas (velocidade e direção do vento):

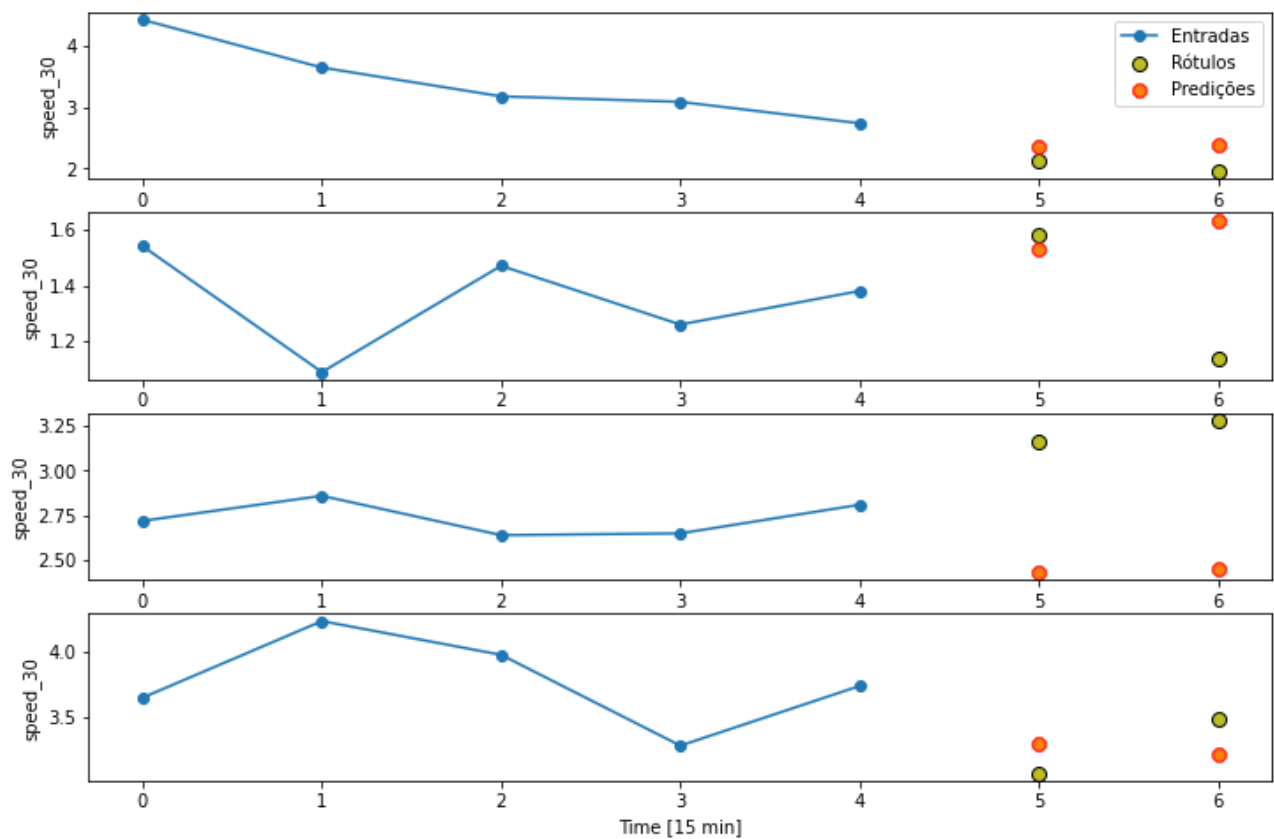


Gráfico 13

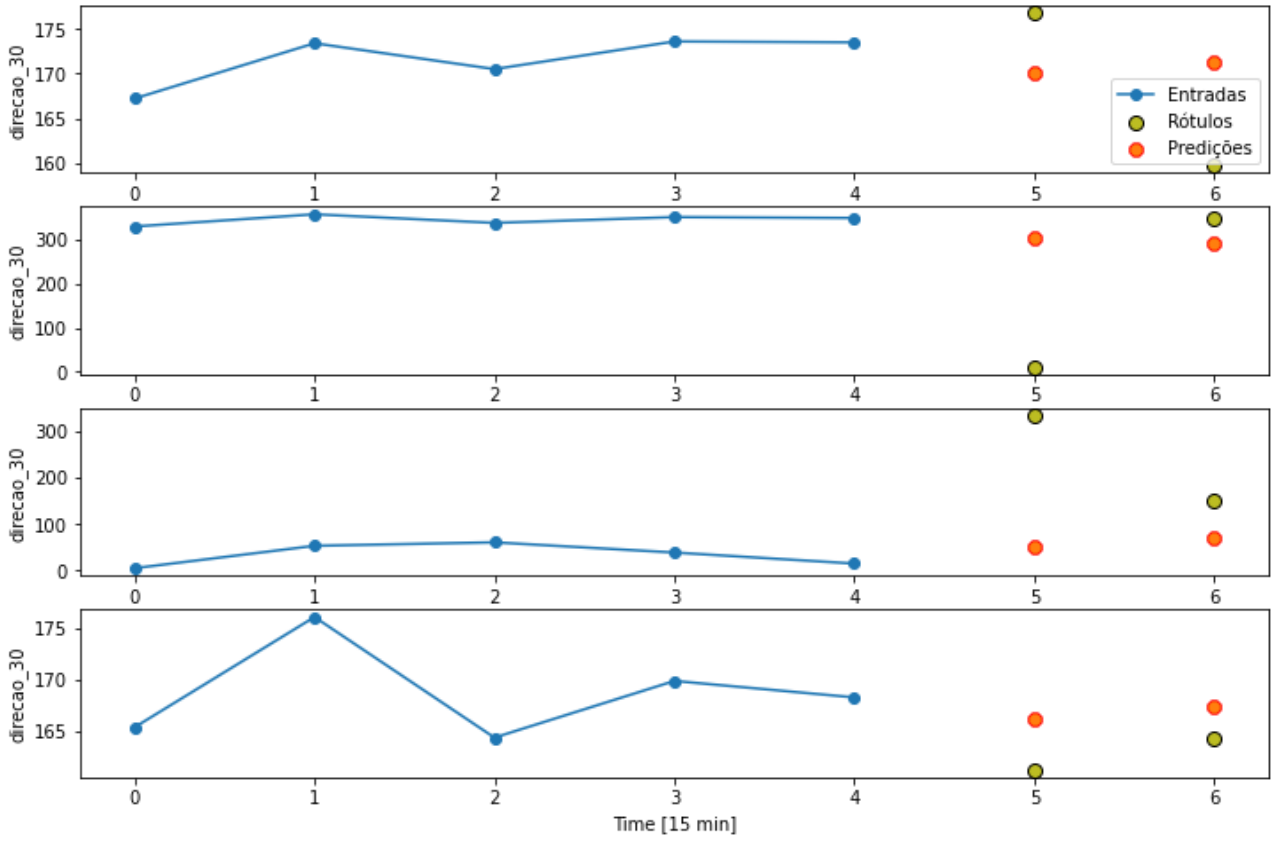


Gráfico 14



O desempenho dos modelos está representado nos gráficos 15 e 16:

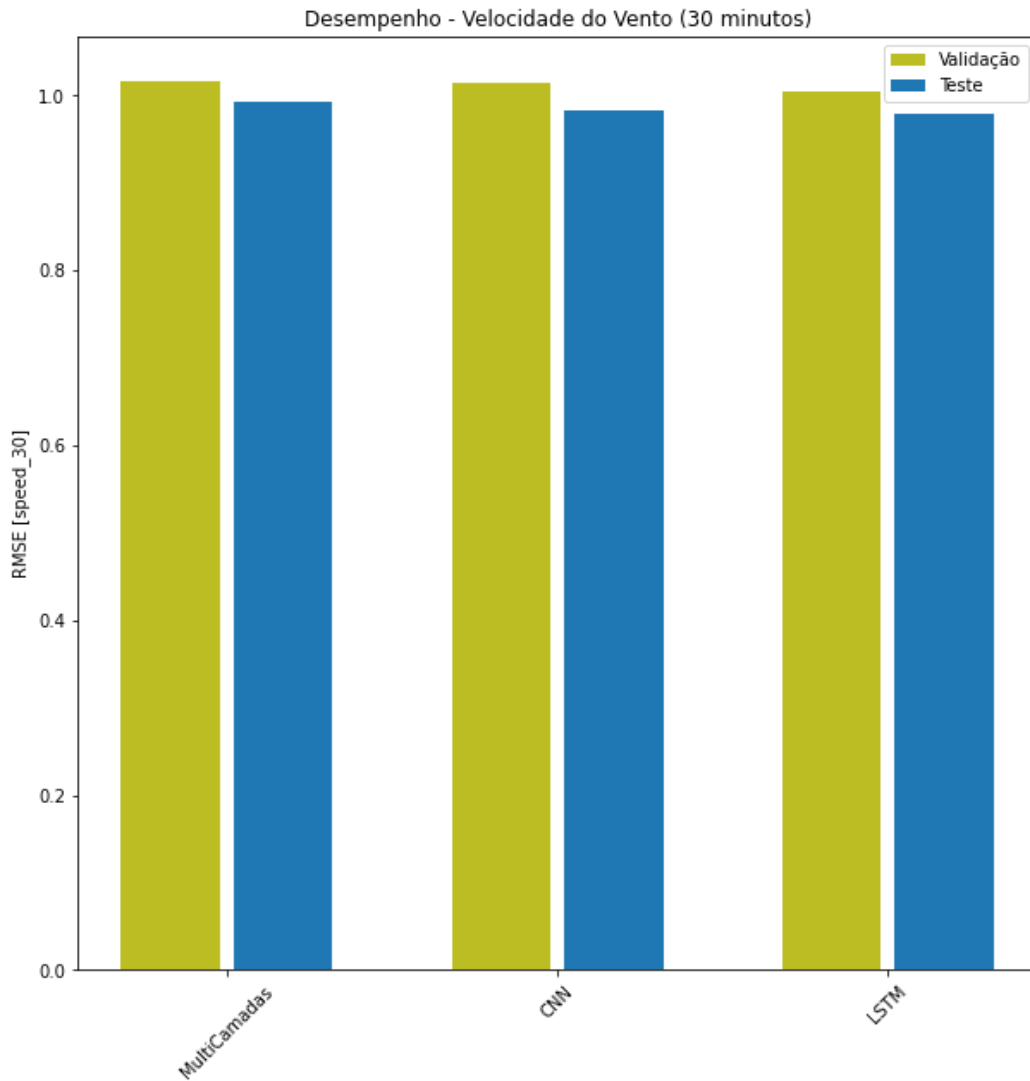


Gráfico 15

Os modelos tiveram desempenhos semelhantes para a previsão de velocidade do vento. Os valores de desempenho dos testes foram:

MultiCamadas: 0,9935

CNN: 0,9828

LSTM: 0,9957

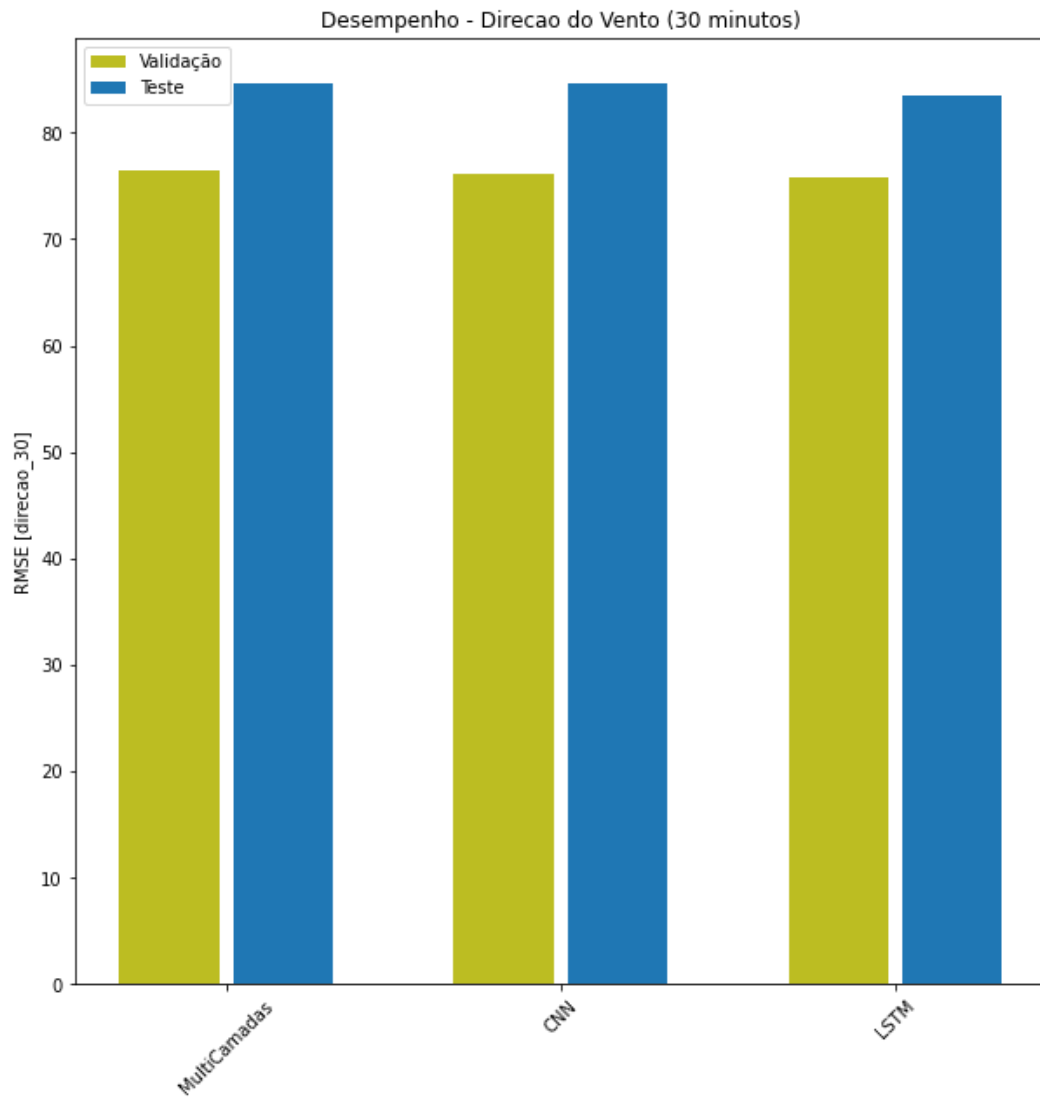


Gráfico 16

Os modelos tiveram desempenhos semelhantes para a previsão de direção do vento. Os valores de desempenho dos testes foram:

MultiCamadas: 84,35

CNN: 86,14

LSTM: 83,13



4 Conclusões

O desempenho dos modelos de previsão para 2 intervalos futuros (30 minutos), obteve pior desempenho que os modelos de previsão para 1 intervalo futuro (15 minutos).

De acordo com a análise exploratória dos dados, os valores de velocidade do vento se concentram entre 2 e 5 m/s. O modelo CNN obteve o desempenho de 0,7659 (RMSE). Este valor de RMSE, é significativo para representar uma incerteza no critério de troca de cabeceira. De acordo com ANAC (<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/condicoes-meteorologicas-adversas-para-o-voe/rajadas-de-vento#proa>), apenas até a velocidade de 5kt (2,57 m/s) o vento é considerado inofensivo para as operações de pouso e decolagem e não requer uma mudança de cabeceira.

Em ambos os testes de previsão, para 15 e 30 minutos à frente, os dados modelados de direção do vento tiveram um RMSE elevado. O menor RMSE obtido foi 70,07 (CNN 15 minutos) e o máximo foi 86,14 (CNN 30 minutos). A significância deste RMSE é alta pois representa incerteza no quadrante em que o vento atua sobre pista, e que, associado a velocidade, pode demandar a troca de cabeceira.

Em ambos os casos, tanto de velocidade e quanto de direção do vento, a modelagem de uma amostra de dados mais longa e consistente se faz necessária para continuidade do estudo e qualidade satisfatória do resultado.

5 Requisitos

Para o melhor desempenho dos modelos é necessário:

- coleta dados desde a superfície até pelo menos 500 m de altura. Uma vez que os fenômenos podem ocorrer desde rentes à pista até centenas de metros acima da mesma.
- coleta de dados com maior consistência e por um período suficientemente longo, no mínimo 5 anos. Deste modo, será possível identificar padrões de vento associados ao ciclo diário, sazonalidade e uma parte da variabilidade climática.
- coleta de dados de outros parâmetros meteorológicos, como temperatura e pressão. Uma vez que o vento e suas variações respondem a variações destes campos. A base atual contempla apenas dados relacionados ao vento.



Apêndice

1	Vento e windshear	27
1.1	Efeitos do vento e windshear na aviação.....	27
2	Ocorrência de windshear do ponto de vista meteorológico.....	0
2.1	Jato de baixos níveis noturno	0
2.1.1	Camada Limite Planetária	0
2.2	Brisa marítima e terrestre	3
2.3	Microburst	4
3	Equipamentos para medir vento e windshear	7
3.1	SODAR	7
3.2	LIDAR.....	8
4	Bibliografias sobre detecção de windshear de baixos níveis.....	0
4.1	Probabilidade de ocorrência de microburst	0
4.2	Previsão por critérios meteorológicos	0
4.3	Aprendizagem de máquina.....	2
	Referências bibliográficas	0



Apêndice

1 Vento e windshear

O vento é o ar em movimento, resultante da diferença da pressão atmosférica e temperatura entre diferentes lugares, que sopra livremente no espaço tridimensional. Possui velocidade e direção, e pode ser resolvido na forma de três componentes vetoriais ortogonais (usualmente com as notações: u , v e w). Em relação a superfície da Terra, estas componentes são as direções norte e sul, leste e oeste, e para cima e para baixo (ICAO, 2005).

Quando uma quantidade de ar é aquecida, expande-se e torna-se menos densa, tendendo a ascender (subir) na atmosfera. O ar mais frio adjacente, por sua vez, tende a ocupar o espaço vazio da parcela de ar ascendida. Então, em um mecanismo ininterrupto de compensação atmosférica, o ar sopra das mais altas para as mais baixas pressões, e o denominamos vento.

O cisalhamento do vento (*windshear*), é a variação local da velocidade do vento em uma determinada direção, vertical ou horizontal. Ocorre devido à intensos gradientes ou inversões de temperatura e pode ser observado em altas e baixas altitudes. Quanto maior a diferença da velocidade do vento em um determinado espaço, maior o windshear, usualmente dado por ft/100kt ou m/s/m (1/s) (ICAO, 2005).

Este documento detém-se a comentar o comportamento de alguns casos de windshear de baixas altitudes para a aviação.

5.1 Efeitos do vento e windshear na aviação

Os primeiros 500 m (1600 ft) da atmosfera são de particular importância para pouso e decolagem de aeronaves, pois o windshear pode causar variações bruscas na força de sustentação da mesma, causando movimento de afundamento ou subida (ICAO, 2005 e Fujita, 1985).

A resposta das aeronaves ao windshear depende da intensidade e duração do windshear em relação ao tipo de aeronave e fase do voo. REDEMET (2016) classifica as ocorrências de windshear de acordo com a intensidade vertical, visto na Tabela 1. Onde kt (nós), representam velocidade e ft (pés), representam a altura. No Brasil as torres de controle devem registrar os reportes de windshear que ocorrem da superfície até 2000 ft (aproximadamente 600m). Nota: 1 kt é 0,514 m/s; 1 ft é 0,305 m; 1m/s é 1,943 kt; 1m é 3,280 ft.



Tabela 1 - Intensidade do windshear. Fonte: REDEMET, 2016.

Intensidade do windshear	kt/100ft	m/s/m = 1/s
Leve	0 a 4	0 a 0,068
Moderado	5 a 8	0,084 a 0,135
Severo	9 a 12	0,152 a 0,203
Extremo	> 12	> 0,204

Reconhecer sinais que indiquem cisalhamento do vento de baixos níveis próximos a aeroportos permite que os pilotos tomem decisões antecipadas, dando a volta, adiantando ou atrasando o voo, a aproximação ou a decolagem, até que as condições melhorem.

Se uma aeronave encontrar uma rápida mudança de vento contrário ou de vento de cauda, devido a inércia, por um período finito, sua velocidade também mudará. Esta mudança na velocidade do ar, altera a sustentação e o arrasto, perturbando o equilíbrio das forças que atuam na aeronave (ICAO, 2005). O distúrbio no equilíbrio das forças atuando na aeronave cria uma força resultante, descrita na Tabela 2. Onde T é o impulso, D é o arrasto, W é o peso, θ é o ângulo de subida e g é a aceleração da gravidade.

Tabela 2 - Efeito do windshear no equilíbrio da aeronave durante as fases de voo.
Fonte: ICAO, 2005.

	Em equilíbrio	Com windshear
Subida	$T - D - W \sin \theta = 0$	$T - D - W \sin \theta$
Nível de voo	$T = D$	$T - D = (W / g) * \text{aceleração ao longo do voo}$
Descida	$T - D + W \sin \theta = 0$	$T - D + W \sin \theta$

A aeronave acelera na direção em que a força perturbadora resultante (R) atua, até que o equilíbrio seja alcançado. A partir do equilíbrio reestabelecido, a aeronave inevitavelmente voa em uma nova trajetória de voo e, de acordo com a primeira lei de Newton, permanece até que o equilíbrio seja novamente perturbado. As mudanças na trajetória de voo devido ao cisalhamento do vento são mostradas na Figura 1.

O windshear pode ocorrer devido a diferença nas componentes horizontais e mudança na componente vertical do vento (updraft/downdraft), que é a situação de windshear mais perigosa. Situações meteorológicas que geram updraft e downdraft, geralmente estão associadas a nuvens convectivas.



Um downdraft causa mudança transiente no ângulo de ataque¹, reduzindo o coeficiente de sustentação e perturbando o equilíbrio das forças que atuam sobre a aeronave. A força resultante faz com que a aeronave voe abaixo da trajetória pretendida aeronave. Um updraft atua no sentido contrário (ICAO, 2005).

Os cálculos de windshear na região de aeroporto devem levar em conta a orientação da pista. A escolha adequada da pista para pouso e decolagem de aeronaves, se dá a partir do vento contrário/vento de cauda (ICAO, 2005).

Situações em que há cisalhamento nos ventos contrário/vento de cauda em relação a pista, podem ser encontrados próximo ao solo, incluindo pouso e decolagem em fortes gradientes de vento (especialmente correntes de jato de baixos níveis), através de superfícies frontais e nas proximidades de tempestades (ICAO, 2005).

¹ Ângulo de ataque é o ângulo entre a asa do avião (corda do aerofólio) e o fluxo de ar (direção do vento relativo). Fonte: <http://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/gerenciamento-da-seguranca-operacional/safety-enhancements-se/seloci03sistemadengulodeataqueaoa.pdf>

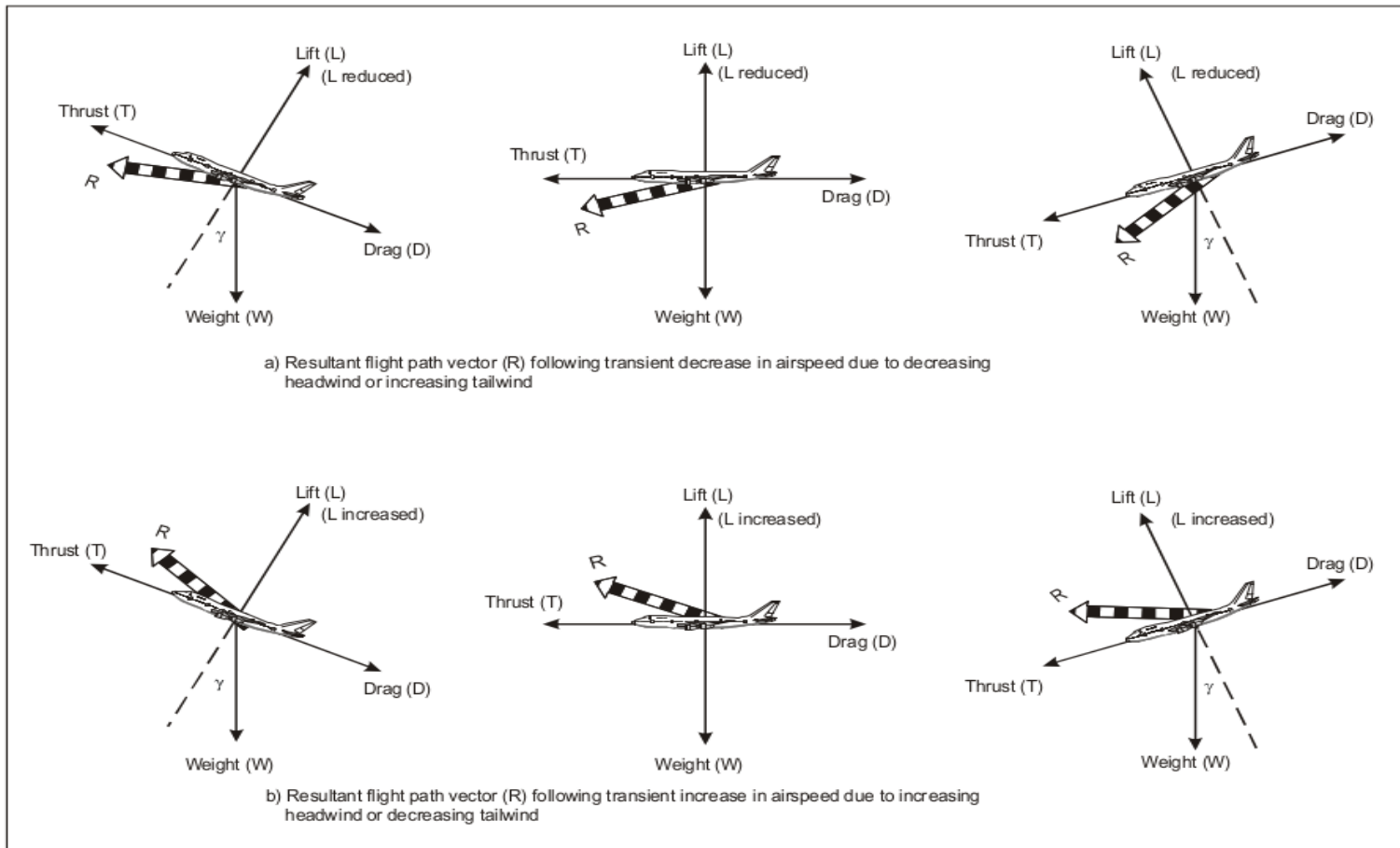


Figura 1- Força resultante R, do windshear na aeronave durante as fases de voo. Fonte: ICAO, 2005.



6 Ocorrência de windshear do ponto de vista meteorológico

De acordo com Fujita (1985), ICAO (2005) e REDMET (2016), a ocorrência de windshear pode estar associada a fenômenos meteorológicos, como: sistemas frontais, jato de baixos níveis, atividade convectiva, trovoadas isoladas, brisa marítima ou terrestre, tornados, microbursts e downbursts, ondas de montanha e ciclo diurno da camada limite planetária. Os exemplos a seguir, representam fenômenos que podem causar windshear, impactar a aviação, e que ocorrem em diferentes altitudes.

6.1 Jato de baixos níveis noturno

6.1.1 Camada Limite Planetária

A Camada Limite Planetária (CLP) é a região da atmosfera compreendida entre a superfície e os próximos 2 km altura, aproximadamente, e onde ocorrem a maior parte das tempestades, como tornados e microbursts (Fujita, 1985). Esta camada da atmosfera é dominada por movimentos turbulentos¹ que desempenham o papel de misturar propriedades como: temperatura, umidade e poluentes.

De acordo com Stull (2008), a CLP apresenta um ciclo diurno determinado pela incidência de radiação solar, rugosidade e cobertura da superfície, que forma a Camada Limite Convectiva (CLC), Camada Residual (CR) e Camada Limite Estável (CLE), observado na Figura 1.

A CLC se desenvolve devido à turbulência térmica, provocada pelo aquecimento da superfície, e atinge máxima altura no período da tarde. Após o pôr do sol, há decaimento da turbulência térmica e redução da espessura da CLC, dando origem à duas outras camadas: a CLE e, acima, a CR que conserva as propriedades da CLC que a antecedeu.

Entre a CR e a CLE, na altura de 100 a 300 m acima da superfície, ocorre o Jato de Baixos Níveis (JBN), Stull (1988). O JBN na CLP, descreve um máximo do perfil vertical do vento e a altura onde ocorre, exibe forte windshear (Davis, 2000). Weipert et al., 2014, em um estudo para os aeroportos de Munich e Frankfurt, observaram que a maior parte dos casos de windshear estiveram associados a condições de JBN (Figura 2).

O JBN possui velocidade que varia de 10 a 30 m/s e largura de centenas de quilômetros, podendo ser comparado a uma folha de papel. Produz impactos na segurança de vôo e, apesar da



sua importância, a simulação dos JBNs é uma tarefa com alto custo computacional, devido às suas escalas temporal e espacial típicas.

O JBN na CLP é dependente do ciclo diário, sendo mais observado entre o por e o nascer do sol, e tem variação nas características de acordo com a sazonalidade e região onde são medidos.

Kallistratova et al (2009), em um estudo para o JBN no verão de Moscow, encontraram que na área urbana as correntes de jato apareceram com menos frequência e em altitudes mais elevadas do que na zona rural.

Kallistratova e Kouznetsov (2012) avaliaram as propriedades estatísticas do JBN no centro e área rural de Moscow, obtendo que os JBN noturnos de verão, tem um ciclo diário bem definido. Em contraste, os JBN de inverno de longa duração não apresentam variabilidade diária, bem definida. Acima da cidade, os windshear são mais elevados, mais fracos e observados mais raramente do que no local rural.

¹Movimento turbulento de um fluido é a condição irregular do escoamento, na qual as várias quantidades envolvidas apresentam uma variação randômica no tempo e no espaço.

Fonte: mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/TransCal_II_Mec2348/7-TraznsCall_II-Mec2348_Turbuencia.pdf

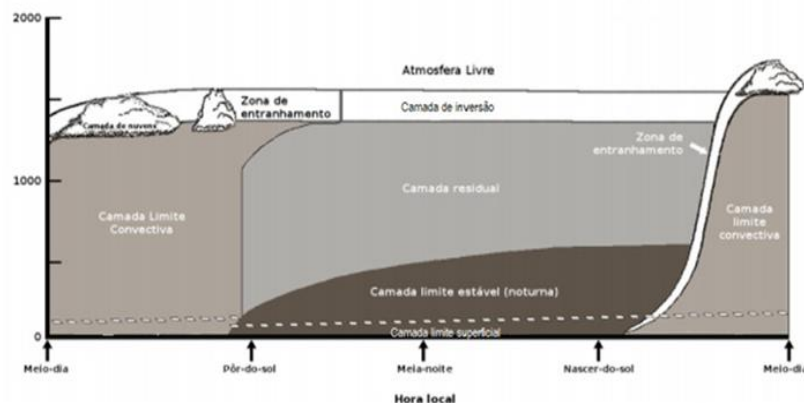


Figura 2 - Modelo Conceitual da camada limite planetária. Fonte: Oliveira, P. E. S., 2017.

A Figura 3, mostra o perfil de vento entre 40 e 280 m de altura na cidade de Iperó, no interior do estado de São Paulo, em um estudo de Beu (2019). O objetivo é mostrar a variabilidade da altura do JBN, variando de 120 a 260 m em poucas horas, e sua dependência atrelada ao ciclo diário, ocorrendo apenas no período da madrugada.

Estas questões, somadas aos resultados obtidos por Kallistratova e Kouznetsov (2012) e Kallistratova et al (2009), reforçam a importância de um estudo observacional prévio para a região de interesse, anterior a qualquer aplicação referente à determinação de altura do e variabilidade do JBN.

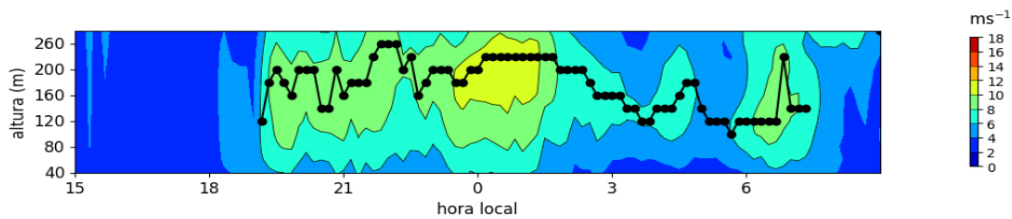


Figura 3 - Perfil vertical do vento horizontal (m/s). Pontos ligados em preto, representam o JBN. Fonte: Beu, 2019.

A Figura 4, mostra o efeito do JBN no equilíbrio e mudança na trajetória de uma aeronave durante uma decolagem. O JBN nas proximidades de aeroportos é citado em uma série de acidentes aéreos aeroportos e é considerado um dos problemas mais complexos da aviação (ICAO, 2005 e Buzdugan e Stefan, 2020).

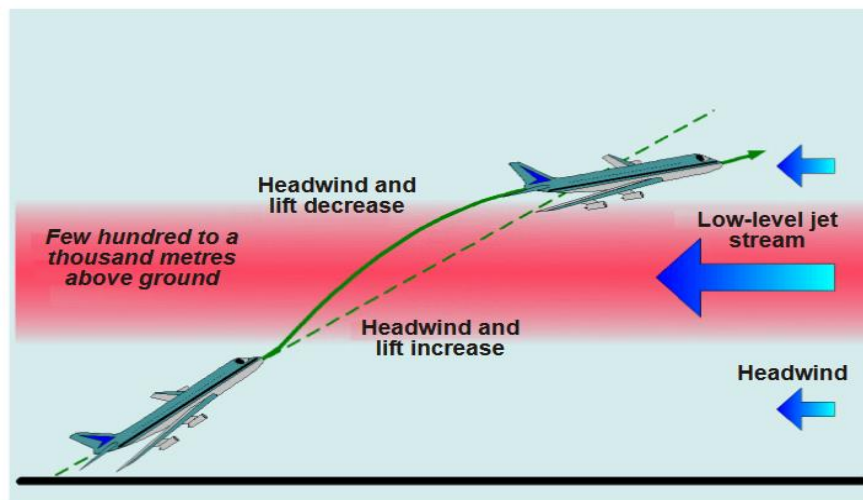


Figura 4 - Windshear na aviação devido ao jato de baixos níveis. Fonte: ICAO, 2005.



6.2 Brisa marítima e terrestre

Em áreas terrestres adjacentes a grandes massas de água, como o mar ou lagos, há uma variação diurna bem definida, na direção do vento à superfície. Esta variação ocorre devido ao gradiente de temperatura que se desenvolve entre a porção de água e o continente.

Durante o dia, o ar sobre a porção de água é mais resfriado do que o ar sobre a porção continental e a brisa se dá do mar para a terra, denominando-se brisa marítima. Durante a noite, o ar continental se torna mais resfriado em comparação ao ar sobre a porção de água e a brisa ocorre do continente para o mar, denominando-se brisa terrestre (Figura 5(a)).

A brisa marítima é muito mais forte do que a brisa terrestre, por conta do intenso gradiente, e pode penetrar até 48 km para o interior no meio da tarde e estender-se até 360 m (1200 ft) acima da superfície (ICAO, 2005).

O cisalhamento do vento na brisa marítima ocorre predominantemente na superfície. No período de máximo desenvolvimento da brisa marítima, que ocorre ao final da tarde, a convergência e convecção vigorosa podem gerar tempestades localizadas e trovoadas.

No caso de porções de água que fazem adjacência com encostas, o fluxo da brisa terrestre e ventos de encostas podem convergir, favorecendo a convecção e o windshear, ver Figura 5(b), (ICAO, 2005).

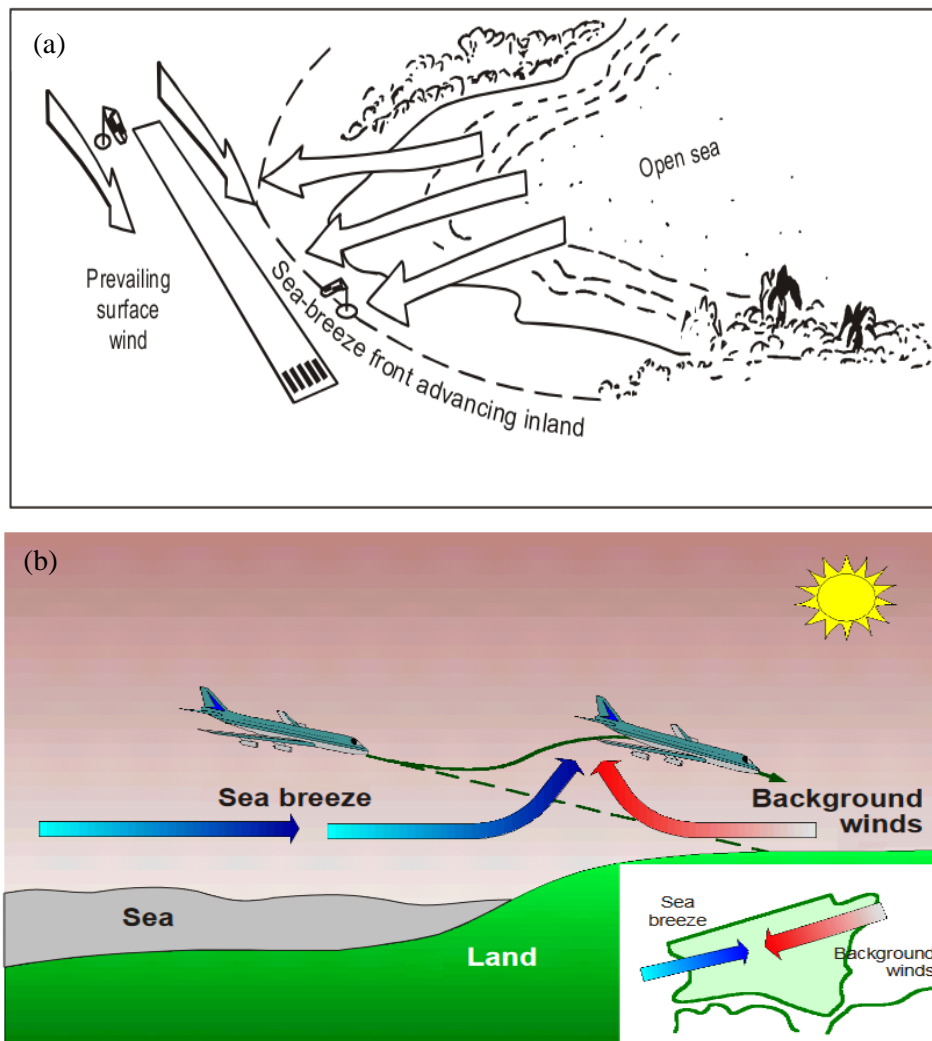


Figura 5 - Windshear na aviação devido a brisa marítima (a) sobre a pista e (b) em regiões de encosta. Fonte: ICAO, 2005.

6.3 Microburst

Na microescala², pode ser observado um fluxo de vento muito intenso e descendente (downdraft), denominado microburst, o qual é um fator relevante em acidentes de aeronaves durante decolagens e aterrissagem (Fujita, 1985 e ICAO 2005).

² Microescala é a menor escala meteorológica, na qual os fenômenos ocorrem com dimensão espacial de 1 metro a 1km, e duração da ordem de 1 segundo até um dia. Fonte: www.lcb.iag.usp/material/apereira/aca115/textos/Aulas_1_2_3.pdf

Um microburst é caracterizado por uma forte corrente descendente do vento (componente w), que apresenta divergência do vento (componentes u e v) repentina na proximidade com a superfície (Figura 7(a) e (b)). A Figura 7b mostra os possíveis efeitos do microburst sobre a trajetória da aeronave em diferentes pistas.

Este fenômeno estende-se horizontalmente de 0,4 a 4km e pode produzir ventos de até 75m/s (ICAO, 2005). Pode, ou não, ser acompanhado de chuva, está frequentemente associado a trovoadas severas e podem ser produzidas por qualquer nuvem de convecção.

Devido a sua pequena escala, de tamanho e tempo de vida menor de 10 minutos, um microburst frequentemente escapa da detecção de radares e anemômetros de superfície. Deste modo, uma aeronave pode encontrar um microburst inesperadamente (Fujita, 1985).

Quando uma aeronave encontra um microburst logo após a decolagem, sua taxa de subida diminui à medida que voa para a seção de fluxo descendente (Figura 6). O enfraquecimento da velocidade do fluxo descendente sinaliza o início do vento favorável, mas há diminuição na velocidade pretendida.

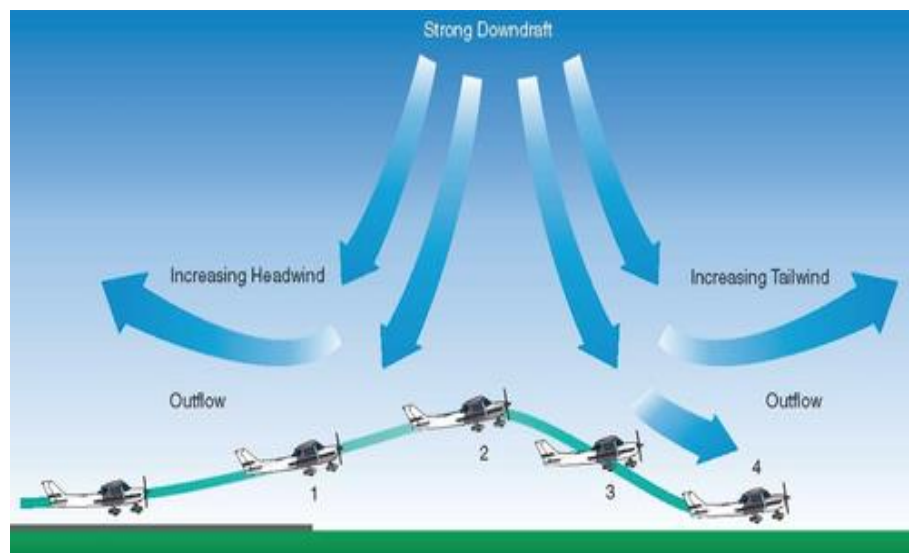


Figura 6 - Windshear devido ao microburst durante a decolagem. Fonte: ANAC, 2020.

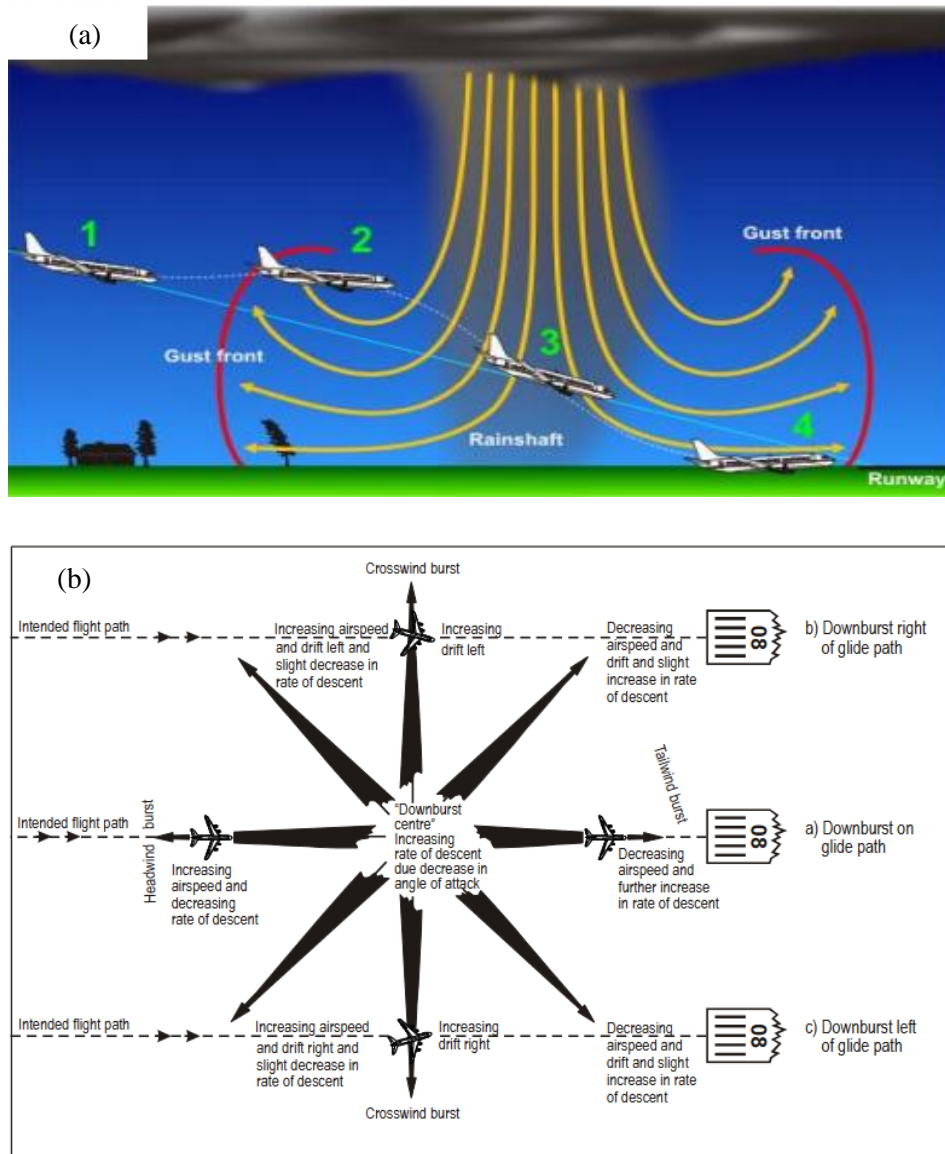


Figura 7 - Efeitos do windshear em um microburst: (a) durante a aterrissagem (ANAC, 2020) e (b) em três locais em relação a trajetória de planeio. Sem que haja intervenção do piloto (ICAO, 2005).



7 Equipamentos para medir vento e windshear

Dadas as características de pequena escala, de tempo e espaço, e a baixa previsibilidade do windshear de baixos níveis, os instrumentos que fazem a detecção de perfis de vento na atmosfera tem se tornado cada vez mais explorados para alerta deste tipo de fenômeno. Os instrumentos para medir de windshear, reduzem o risco deste fenômeno afetar as operações comerciais e aumentam sua probabilidade de detecção.

Equipamentos como LIDAR (Light Detection and Ranging) e SODAR (Sound Detection and Ranging), são perfiladores de vento e vêm sendo amplamente utilizados como suporte a radares doppler para alerta de condições de windshear de baixos níveis, que não são associados a tempestades, mas a condições de céu claro. Um perfilador de vento é um instrumento, que pode medir a velocidade e a direção do vento verticalmente e horizontalmente na atmosfera. A partir dos perfis de vento, informações sobre o windshear podem ser calculadas e exibidas.

7.1 SODAR

O SODAR (Sound Detection and Ranging) é um instrumento de sensoriamento remoto a partir do solo, que mede o vento tridimensionalmente nas primeiras camadas da atmosfera, sendo capaz de medi-lo até 2km (Bradley, 2008). Este equipamento emite pulsos acústicos curtos e recebe a onda sonora retroespalhada gerada pelas flutuações de densidade de pequena escala, associadas a não homogeneidade do ar, gerado pela turbulência, na presença de gradientes de temperatura. Esta mudança de frequência pode ser medida e o movimento relativo do espalhamento transmissor - receptor pode ser calculada (Little, 1969).

Este equipamento, é amplamente utilizado para análise de perfis de vento e ocorrência de windshear (Kallistratova et al., 2009; Kallistratova e Kouznetsov, 2012). Na aviação, a aplicabilidade do SODAR, se deve a sua capacidade de operar em condições de nuvens baixas ou baixa visibilidade, que devem acompanhar situações de inversão de temperatura de baixos níveis e sistemas frontais, que geram o windshear (Ribeiro et al., 2020; Buzdugan e Stefan, 2020; Silva et. al, 2016). Buzdugan e Stefan (2020), mostraram que os perfis obtidos a partir do SODAR representam bem as proximidades do aeródromo, em condições não convectivas.

Algumas limitações referem-se a sua possibilidade de deterioração em ambientes muito ruidosos e com chuvas muito intensas. Os tempos de integração de dados SODAR variam, em média, de 10 a 20 minutos, o que é muito tempo para o fornecimento de avisos oportunos de



cisalhamento do vento convectivo. Espera-se que os desenvolvimentos recentes reduzam para menos de 5 minutos (ICAO, 2005).

7.2 LIDAR

O LIDAR (Light Detection and Ranging) é um instrumento que transmite um feixe laser e mede a radiação retroespalhada recebida de volta pelo instrumento. Os LIDARs podem operar nos comprimentos de onda do ultravioleta, visível e infravermelho. Cada uma delas interagirá de maneira diferente com os processos físicos da atmosfera.

Este equipamento é capaz de medir vento tridimensionais em uma altura de 6 a 8 km. Devido ao feixe estreito e colimado, as medições do LIDAR são menos afetadas pela interferência no solo, permitindo que os dados sejam obtidos a poucos metros da superfície (ICAO, 2005).



8 Bibliografias sobre detecção de windshear de baixos níveis

Foram encontradas metodologias são para previsão e probabilidade de ocorrência de windshear considerando observações variáveis meteorológicas e outras considerando técnicas de aprendizado de máquina. Em todas as técnicas, o sucesso da aplicação depende da consistência e qualidade dos dados observados.

8.1 Probabilidade de ocorrência de microburst

A Tabela 1, adaptada da tabela 4-1 ICAO (2005), mostra as probabilidades de windshear devido a microburst que podem ser trabalhadas como critérios para metodologias futuras em detecção do fenômeno nas proximidades do aeroporto. Foram selecionados os critérios de que necessitam exclusivamente de ferramentas como radar, sondagens atmosféricas, modelagem numérica do tempo.

Tabela 2 - Guia de probabilidade de windshear. Fonte: Adaptado de ICAO, 2005.

Observação	Probabilidade de windshear
- Precipitação intensa: indicações via radar, em vermelho ou sombra de atenuação.	Alta
- Chuva (rain shower)	Média
- Relâmpago	Média
- Virga	Média
- Moderada ou alta turbulência, reportada pelo indicadores do radar.	Média
- Temperatura/temperatura do ponto de orvalho distribuída entre 17 e 28°C.	Média
- Previsão de tempo convectivo	Baixa



8.2 Previsão por critérios meteorológicos

O departamento de meteorologia do Reino Unido (Met Office), sugere regras baseada em variáveis meteorológicas, para a previsão e alerta do windshear. As metodologias variam para a estação de inverno, de verão e para a detecção de JBN noturno. Todos os critérios mencionados a seguir foram obtidos do Apêndice 8 de ICAO, 2005.

V_{10} = Vento à 10 m (vetor)

$V_{10} = |V_{10}|$ = Velocidade do vento a 10 m (escalar)

V_G = Gradiente vento (vetor) à 600 m (ou 2000 ft)

$V_G = |V_G|$ = Gradiente da velocidade do vento à 600 m (ou 2000 ft)

T_a = Temperatura da superfície

Condições de inverno

O aviso deve ser emitido se os seguintes critérios forem satisfeitos:

- 1) $V_{10} \geq 30$ kt
- 2) $V_{10} \geq 10$ kt e $V_G - 2V_{10} \geq 25$ kt
- 3) $V_{10} \leq 10$ kt e $|V_G - V_{10}| \geq 40$ kt
- 4) $V_{10} \leq 10$ kt e $|V_G - V_{10}| \geq 30$ kt

e isoterma ou inversão de temperatura abaixo de 600 m.

- 5) Tempestade em 20 km e/ou Cumulonimbus dentro de 10 km da região de aproximação e subida.
- 6) Zona frontal abaixo de 600 m, na região de aproximação e subida com:
 - a. mudança vetorial do vento em 10 kt, ou
 - b. diferença de temperatura de pelo menos 5°C, ou
 - c. velocidade do vento de pelo menos 30 kt.
- 7) Suspeita de JBN significativo abaixo de 600 m.
- 8) Reportes windshear proveniente de aeronaves, na hora anterior.



Condições de verão

O aviso deve ser emitido se os seguintes critérios forem satisfeitos:

- 1) $V_{10} \geq 30$ kt
- 2) $|V_G - V_{10}| \geq 40$ kt
- 3) $|V_G - V_{10}| \geq 30$ kt e uma inversão ou camada isotérmica abaixo de 600 m.
- 4) Presença de:

- a. Tempestade em 10 km
- b. Cumulonimbus em 5 km

ambas (a e b) com trajetória deslocando-se para a estação.

- 6) Presença de superfície frontal ou qualquer descontinuidade abaixo de 600 m como:

- a. mudança na magnitude do vento em até 10 kt, observada localmente ou na estação mais próxima, ou
- b. diferença de temperatura à frente de pelo menos 5°C, ou
- c. velocidade do vento de pelo menos 30 kt.

- 7) Suspeita de JBN significativo abaixo de 600 m.

Reportes windshear provenientes de aeronaves, na hora anterior.

Jato de baixos níveis noturno

Baseado em observações das 2100, 0000, 0300 e 0600 GMT. É considerada a suspeita de jato de baixos níveis noturno, se os seguintes critérios forem atendidos:

- 1) Horário está no range entre: por do sol + 3 horas e nascer do sol + 1 hora
- 2) Inversão de temperatura em superfície ou camada isotérmica presente, e deve estar presente por pelo menos 3 observações precedentes, e $T_a T_a (\max) - T_a T_a \geq 10^\circ\text{C}$
- 3) $V_{10} \leq 10\text{kt}$ e $V_{10} (\max) \geq 10\text{kt}$
- 4) $V_G \geq 10\text{kt}$ e $V_G (\text{por do sol}) \geq 10\text{kt}$
- 5) Sem passagem de frente fria desde 1200 GMT



Notas:

- 1) V_{10} (max) e $T_a T_a$ (max) são o máximos valores reportados de V_{10} e $T_a T_a$ (max) das 1300 até 1800 GMT inclusive (na manhã anterior)
- 2) Se todos os critérios são satisfeitos, o JBN deve ser suspeito para a hora corrente e as duas horas seguintes.

8.3 Aprendizagem de máquina

Khattak et al., 2022 utilizaram aprendizado de máquina para prever e interpretar windshear de baixos níveis sobre a região da pista do aeroporto internacional de Hong Kong, focados na camada entre a superfície e 800 ft. Para obtenção de seus resultados, trabalharam com 234 casos windshear de baixos níveis, reportados por de pilotos e dados meteorológicos.

Os reportes dos pilotos incluíram:

- magnitude e altitude em que foi experienciado o windshear, durante as fases de aproximação e decolagem das aeronaves
- orientação da pista usada para aproximação e decolagem das aeronaves.

As informações meteorológicas consideradas foram:

- direção do vento
- velocidade média do vento
- temperatura média horária

A metodologia também considerou os casos de windshear por:

- período do dia
- sazonalidade

Os autores enfatizam que uma quantidade substancial de dados de windshear é essencial para o desenvolvimento de modelos de previsão.



Referências bibliográficas

ANAC, 2020: <https://www.anac.gov.br/en/safety/aeronautical-meteorology/conditions/wind-shear#Windshear> Acessado em Outubro de 2023.

BALMEZ, M.; STEFAN, S. On the formation mechanism of low-level jet over Bucharest's airports, *Romanian Journal of Physics*, v. 59, n. 7–8, p. 792–807, 2014.

BANTA, R. M.; PICHUGINA, Y. L.; BREWER, W. A. Turbulent velocity-variance profiles in the stable boundary layer generated by a nocturnal low-level jet. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 63, n. 11, p. 2700-2719, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAS3776.1>

BEU, C. M. L., Estudo do jato de baixos níveis em Iperó com a técnica lidar Doppler, 128p - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-15092020-110621/pt-br.php>

BRADLEY, S. *Atmospheric Acoustic Remote Sensing*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2008.

BUZDUGAN, L.; STEFAN, S. A comparative study of sodar, lidar wind measurements and aircraft derived wind observations, *Romanian Journal of Physics*, v. 65, n. 5-6, p. 1-15, 2020.

DAVIS, P. A. *Development and mechanisms of the nocturnal jet*. *Meteorological Applications*, Cambridge University Press, v. 7, n. 3, p. 239-246, 2000.

FUJITA, T. T. *The Downburst*, The University of Chicago, 128p, 1985.

INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), *Manual on Low-Level Wind Shear*, Doc. 9817, AN/449, 2005.

KALLISTRATTOVA, M. A.; KOUZNETSTOV, R. D.; KUZNETSOV, D. D.; KUZNESOVA, I. N.; NAKHAEV, M.; CHIROKOVA, G. Summertime low-level jet characteristics measured by sodars over rural and urban areas, *Meteorologische Zeitschrift*, v. 18, n. 3, p. 289–295, 2009.

KALLISTRATTOVA, M. A.; KOUZNETSOV, R. D. Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network, *Boundary-layer meteorology*, v. 143, n. 1, p. 159–175, 2012.



KHATTAK, A.; CHAN, P; CHEN, F.; PENG, H. Prediction and Interpretation of Low-Level Wind Shear Critically Based on Its Altitude above Runway Level: Application of Bayesian Optimization-Ensemble Learning Classifiers and Shapley Additive explanations. Atmosphere, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13122102>

LITTLE, C. G., Acoustic Methods for the remote probing of the lower atmosphere, Proc. IEEE 57, p. 571-578, 1969.

OLIVEIRA, P. E. S. Estudo da turbulência atmosférica na floresta amazônica – Análise de dados micrometeorológicos e modelagem numérica, 98p, 2017.

Obtido em:
http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14596/TES_PPGMETEOROLOGIA_2017_OLIVEIRA_PABLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

REDEMET, 2016: <http://redemet.decea.mil.br/old/?i=facilidades&p=windshear>
Acessado em outubro de 2023.

RIBEIRO, D. P.; Leal, J. B. V. J; FISCH, G.; RAMOS, D. N. S.; REUTER, J. D. E.; Cisalhamento do Vento no Aeroporto Internacional de São Paulo: Aspectos Observacionais e de Modelagem. Revista Brasileira de Meteorologia, v.35, n.2, p. 301-315, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352020>

SCINTEC AG. Software Manual - APRun Scintec, Rottenburg, 2013.

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.

STULL, R. B. An introduction to boundary meteorology. In: Atmospheric Science Library. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 1988.

WEIPERT, A.; KAUCZOK, S.; HANNESEN, R.; ERNSDORF, T.; STILLER, B., Wind shear detection using radar and lidar measurements at a Frankfurt and Minuch airports, 8th European Conference on Radar Meteorology and Hydrology, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2014.