

3. MEDIÇÃO DO VENTO

3.1 ORGANIZAÇÕES E PROTOCOLOS

A Organização Meteorológica Mundial (OMM), uma agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), é responsável pelo desenvolvimento de protocolos que abordem a instalação de equipamentos e os procedimentos de observação em estações meteorológicas de superfície (EMS). O membro que representa o Brasil na OMM é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

De acordo com a Publicação nº 8 da OMM (2014), anemômetros devem ser instalados a uma altura padrão de $z = 10$ m acima do solo em terrenos abertos. A mesma publicação define terreno aberto como uma área com comprimento de rugosidade $z_0 = 0,03$ m, onde a distância exigida entre qualquer obstáculo e o anemômetro deva ser 10 vezes maior que a altura do obstáculo. Todos obstáculos dentro de um dado raio do anemômetro devem ser mapeados pelo operador da estação para que as observações possam ser corrigidas para uma exposição padrão.

Velocidades horizontais de vento são relatadas como médias e/ou rajadas. Velocidades de vento médias de 10 minutos, V , são relatadas por EMS e utilizadas para fins de previsões, enquanto velocidades de vento médias de 60 minutos são tipicamente usadas para estatísticas climatológicas. A direção do vento é o ângulo predominante durante o tempo de média, DIR , medido em sentido horário a partir do norte verdadeiro. Baseado no relatório de Beljaars (1987), que visou padronizar observações de rajadas, as Publicações nº 8 e 306 da OMM (2014; 2015) recomendam um intervalo de 3 segundos para o cálculo da média ao observar rajadas. Para velocidades de vento inferiores a 5 m/s, a precisão deve estar dentro de 0,5 m/s, e 10% para velocidades de vento maiores que 5 m/s.

Muitas EMS são localizadas em aeródromos e, como tal, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), outra agência especializada da ONU, segue muitas das diretrizes da OMM. O manual regulatório da OACI, comumente referido como Anexo 3 (OACI, 2007), é praticamente idêntico a sua correspondente Publicação nº 49 da OMM para navegação aérea internacional (2016). O Anexo 3 afirma que os códigos meteorológicos aeronáuticos,

incluindo METAR/SPECI (boletim meteorológico de rotina do aeródromo) e SYNOP, são desenvolvidos pela OMM e apresentados na Publicação nº 306 da OMM – Manual de Códigos, Volume I (OMM, 2015).

No Brasil, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), uma Organização Militar da FAB sob direção do Ministério da Defesa, é responsável pela regulação e gerenciamento do Serviço de Informação Aeronáutica (*Aeronautical Information Service – AIS*). O DECEA comanda EMS em aeródromos civis e militares dentro do território brasileiro, e uma de suas responsabilidades é a observação e previsão de condições meteorológicas, embora o gerenciamento da EMS seja do operador do aeródromo. Nos diversos guias e manuais publicados pelo DECEA, incluindo o MCA 101-1: Instalação de Estações Meteorológicas de Superfície e de Altitude (DECEA, 2015[a]) e a AIP: *Aeronautical Information Publication* (DECEA, 2018[a]), a adesão aos padrões e práticas da OMM e OACI é confirmada, especialmente às Publicações nº 8 e 306 da OMM (2014; 2015) e ao Anexo 3 da OACI (2007).

Conforme especificado pelo DECEA (2015[a]; 2018[b]), anemômetros devem ser instalados a uma altura de $z = 10$ m, medidos a partir da base do mastro de suporte, com uma tolerância permitida de $\pm 1,0$ m. Para reduzir a interferência na observação do vento, qualquer obstáculo dentro de um raio de 300 m da torre do anemômetro deve estar localizado a uma distância do anemômetro de pelo menos 10 vezes sua própria altura (DECEA, 2015[a]). Anemômetros são tipicamente instalados na proximidade da zona de toque da pista e, dependendo do tamanho do aeródromo, pode haver mais do que um anemômetro em operação. O número de anemômetros em uso, tipo do anemômetro (concha, hélice ou ultrassônico), sua localização e a identificação do anemômetro principal estão detalhadas na AIP (DECEA, 2018[b]) para muitos aeródromos brasileiros – embora suspeite-se que grande parte da informação esteja desatualizada. Todas observações de vento devem incluir V e DIR , enquanto é recomendado que, quando observadas, rajadas pico, G , sejam medidas com médias durante períodos de 3 segundos (DECEA, 2017). As horas de operação de uma EMS dependem do horário de funcionamento do aeródromo: dos 148 aeródromos brasileiros considerados neste estudo, 53 operaram em regimes H24 em 2017.

O papel do INMET, sob a direção do Ministério Brasileiro de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, é prover informações meteorológicas através do monitoramento, análise e previsão de tempo e clima. Para cumprir essas responsabilidades, o INMET possui sua própria

rede de EMS convencionais e automáticas (EMS-A). Apesar de haver alguns casos de EMS-A localizadas dentro de aeródromos, a rede do INMET é operada independentemente daquelas sob escopo do DECEA. Observações de vento V e DIR são feitas em EMS convencionais nas horas 00:00, 12:00 e 18:00 UTC. Apesar de não serem realizadas observações de rajadas, estações convencionais são equipadas com anemógrafos que poderiam ser de interesse para futuros estudos. Havia 220 EMS convencionais em operação em 2016; entretanto, este estudo não considera dados de redes convencionais devido à baixa resolução temporal das observações. Para EMS-A, o INMET (2011) afirma que os anemômetros são instalados em uma altura de $z = 10$ m acima do solo, mas exige que apenas uma área de 14 m x 18 m ao redor do mastro do anemômetro seja livre de obstáculos. Isso permite a possibilidade de obstáculos significantes estarem localizados a uma distância de 7 m do anemômetro. Observações de vento são compreendidas por velocidade do vento, V (média de 10 minutos), direção, DIR (direção predominante do vento ao longo dos 10 minutos), e rajada, G (média pico de 3 segundos), como confirmado pelo INMET (2011). Até dezembro de 2017, havia um total de 557 estações na rede EMS-A do INMET, incluindo 4 localizadas no Uruguai, e 1 na Antártida. Uma comparação de protocolos de observação do vento para as duas redes meteorológicas que operam no Brasil é feita na Tabela 3.1, com mais detalhes apresentados nas próximas seções.

Tabela 3.1 – Comparação de protocolos de observação do vento.

Característica	Rede Meteorológica	
	EMS de Aeródromo	EMS-A do INMET
Observação	Convencional ou híbrida	Digital
Emissão de boletins	Manual ou automática	Automática
Resolução de velocidade do vento (unidades)	1 (kt)	0,1 (m/s)
Intervalo para cálculo da média de V (s)	600	600
Intervalo para cálculo da média de G (s)	3	3
Frequência de observação de V	Horária (METAR) ou condições especiais (SPECI)	Horária
Condição de observação de G	Quando $G \geq V + 10$ kt; máximo nos últimos 10 minutos	Sempre; máximo nos últimos 60 minutos
Resolução de DIR (°)	10	1
Altura do anemômetro (m)	5,5-11	10
Condições gerais de tempo	Sim	Não

3.1.1 EMS DOS AERÓDROMOS

Observações meteorológicas em aeródromos são disponibilizadas através do Sistema Global de Telecomunicações (*Global Telecommunications System – GTS*) na forma de boletins METAR, SPECI e SYNOP, além de serem armazenadas em bancos de dados locais e nacionais. No Brasil, o Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) é responsável pelo gerenciamento de dados e produtos relacionados ao Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), e conduz pesquisas de modo a aprimorar esse sistema. A operação de cada EMS é de responsabilidade do administrador do aeródromo (INFRAERO, SEIL, DAESP, FAB, etc.). Os boletins meteorológicos METAR/SPECI e SYNOP são enviados de cada EMS para o banco de dados Operacional Meteorológico (OPMET), localizado em Brasília, através do Sistema Automatizado de Registro e Gerenciamento das Observações Meteorológicas (WEBMET), que são então enviados ao GTS. No aeródromo, diversos parâmetros meteorológicos, incluindo vento, temperatura, pressão atmosférica, assim como outros incluindo visibilidade e nebulosidade, são compilados em uma única *string*, que segue o formato METAR/SPECI ou SYNOP. Para aeródromos com diversos anemômetros, apenas as observações do anemômetro principal são incluídas em boletins METAR/SPECI e SYNOP. Os mesmos parâmetros meteorológicos observados, assim como aqueles observados por anemômetros adicionais, são enviados ao Banco de Dados Climatológicos (BDC), sob a responsabilidade do ICEA, localizado em São José dos Campos. Mais detalhes a respeito do WEBMET podem ser encontrados no MCA 105-16 (DECEA, 2015[b]).

Para grande parte dos aeródromos brasileiros, observações eram feitas por meios analógicos/convencionais e registrados utilizando formulários tabulados, similares ao apresentado na Figura 3.1, até o início dos anos 2000. Os formulários estão arquivados no ICEA em São José dos Campos, conforme apresentado na Figura 3.2. A data da mudança das leituras analógicas/convencionais para digitais varia para cada aeródromo, e não existe um banco de dados conhecido que contenha tal informação. O processo de digitalização dos registros meteorológicos de superfície históricos começou em outubro de 1988 e foi finalizado em outubro de 2013 (Rocha, 2016).

Figura 3.1 – Foto de um formulário de observação meteorológica completo preenchido à mão em SBHT – Altamira, PA, para 01/11/1988.



Figura 3.2 – Arquivos do BDC no ICEA em dezembro de 2016.

A implementação de processos digitais aprimorou a precisão das observações de vento. Observações convencionais eram feitas usando instrumentos analógicos, como mostrado na Figura 3.3a), e exigiam que o observador calculasse mentalmente as médias, rajadas e direção predominante do vento, aumentando o número de erros na observações registradas. Processos analógicos também incluem frequentemente anemógrafos nos quais a amplitude da velocidade do vento é registrada utilizando uma caneta/lápis oscilando para cima e para baixo

sobre um papel que se move na direção normal a uma taxa constante; entretanto, nenhuma evidência de seu uso histórico foi encontrada nos aeródromos brasileiros. Processos digitais permitem o cálculo simultâneo de todas leituras relacionadas aos ventos e removem o erro humano da observação. A imagem da leitura digital em tempo real na Figura 3.3b) também demonstra os benefícios da visualização em tempo real dos dados. Vários dados podem ser compreendidos claramente a partir de uma imagem única. Para o exemplo da Figura 3.3b), a linha preta representa a pista de pouso, permitindo a identificação do cisalhamento do vento, e a seta verde-claro, a direção predominante do vento ao longo de 2 minutos. O arco verde-claro representa a variação das direções do vento no período de 2 minutos e, similarmente, o arco verde-escuro em um período de 10 minutos. O número ao centro representa a velocidade do vento instantânea, e pode ser alternada pelo observador para mostrar média em tempo real de 10 minutos, ou qualquer outro período de média pré-programado. Controles similares permitem ao observador visualizar a direção predominante do vento ao longo de 10 minutos, que seria uma seta verde-escuro, nesse caso.

Processos digitais também auxiliam na compilação e emissão dos boletins METAR/SPECI, e limites pré-configurados são utilizados para alertar a necessidade de emissão de um boletim SPECI. Os boletins são automaticamente compilados; entretanto, um observador pode editar o boletim antes de sua emissão. Para EMS-A, tanto compilação quanto emissão do boletim são feitas automaticamente, sem a necessidade de um observador. O uso de EMS-A em aeródromos ainda não é comum no Brasil. Em 03/03/2015, SBSP – Congonhas, SP, se tornou o primeiro aeródromo brasileiro equipado para emitir AUTO METARs. Esse modo é ativado entre 02:00 e 07:00 UTC, e permanece o único aeródromo desse tipo até o fim de 2017.

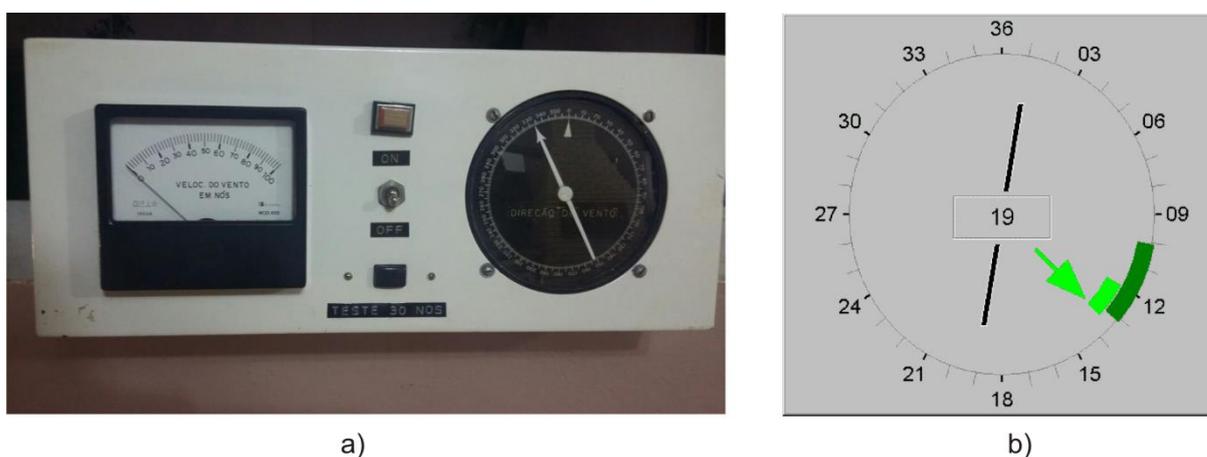


Figura 3.3 – Leituras de velocidade do vento por métodos a) analógicos e b) digitais.

3.1.1.1 METAR/SPECI

Apesar de serem altamente padronizados por OACI e OMM, cada país tem pequenas variações nos procedimentos de elaboração dos boletins METAR/SPECI. Uma inspeção de aproximadamente 23 anos de boletins de 198 estações no estudo revelou que a estrutura pré-definida frequentemente não é seguida de forma rigorosa. Na maioria dos casos, os boletins são divididos em 7 campos: 1. Identificadores de condições meteorológicas e localização; 2. Observações de vento; 3. Visibilidade; 4. Condições gerais de tempo; 5. Informação de nuvens; 6. Temperatura do ar e temperatura de condensação; 7. Pressão atmosférica ao nível do mar. Em alguns casos, informações suplementares podem ser encontradas após o campo de pressão atmosférica, tais como tempo recente, cisalhamento do vento e previsões do tempo. O último caractere de cada boletim deve ser “=” para identificar corretamente o seu término para análise.

O formato utilizado para relatar tempo e localização da EMS é seguido universalmente, e o delimitador de espaço é usado para separar campos. Imediatamente após o identificador METAR ou SPECI no início do boletim está o identificador de localização de quatro letras atribuído pela OACI. Um código OACI começando com “S” denota a região da América do Sul, com os principais aeródromos do Brasil começando com “SB”. Os campos seguintes tomam o formato *YYGGggZ*, onde *YY* é o dia do mês, *GG* é a hora, *gg* minutos e *Z* representa UTC. É importante notar que boletins METAR/SPECI não contêm informação sobre o mês ou ano da observação, e tal informação pode ser obtida apenas a partir dos dados externos ao boletim.

No Brasil, os procedimentos de elaboração de boletins são definidos pela ICA 105-15 (DECEA, 2018[b]) e ICA 105-16 (DECEA, 2017), que subsequentemente define 8 variações aceitáveis de observações de vento. As 7 variações mais comumente encontradas, acompanhadas de exemplos, são apresentadas na Tabela 3.2 A unidade de velocidade do vento utilizada no Brasil é nós (kt). *V* e *DIR* são sempre relatados; a rajada pico de 3 segundos no período de 10 minutos, *G*, é apenas apresentada quando o critério da Tabela 3.1 é atendido.

A 8ª variação é usada no caso de uma observação *V* ou *G* igual ou superior a 100 kt, representada por *P99KT* (*P* para *plus* – “mais”), embora seu uso não tenha sido encontrado em nenhum aeródromo brasileiro de 1996 a 2017. É preocupante que esse protocolo não permita o registro preciso de velocidades de vento acima de 51 m/s. Para países que frequentemente

presenciam ciclones tropicais, tais como EUA e Austrália, o campo de velocidade do vento é estendido para 3 dígitos quando velocidades de vento acima de 100 kt são observadas.

Tabela 3.2 – Boletins METAR/SPECI com campos de observação de vento corretamente formatados.

Tipo	Data (UTC)	Exemplo	DIR (°)	V (kt)	G (kt)
Sem vento (calmo)	02/07/1996	SBLO 021100Z 0000KT 9000 SCT100 ...	-	0	-
Sem leitura	02/08/2006	SBGO 022100Z ////KT 9999 FEW025 ...	-	-	-
Leitura padrão	31/12/2015	SBRJ 312300Z 15006KT 9999 FEW035 SCT100 ...	150	6	-
Leitura com G	17/12/2013	SBPA 171842Z 11014G24KT CAVOK 29/18 ...	110	14	24
Varição de DIR $\geq 60^\circ$ & $< 180^\circ$, V < 3 kt; ou variação de DIR $\geq 180^\circ$	29/12/2008	SBSP 291200Z VRB02KT CAVOK 25/18 ...	-	2	-
Varição de DIR $\geq 60^\circ$ & $< 180^\circ$	05/04/2011	SBSP 051800Z 19007KT 140V240 9999 TS ...	140-240	7	-
DIR variável, com G	08/12/2003	SBPF 011600Z 27020G30KT 230V290 5000 ...	230-290	20	30

A prática atual no Brasil é que os METARs sejam feitos a cada hora, apesar de isso não ser sempre o caso, com METARs feitos em intervalos de 30 minutos no período entre 11/1999 e 10/2001. Boletins METAR especiais (SPECI) são feitos quando existe uma mudança significativa nas condições meteorológicas entre as observações METAR horárias. Um boletim SPECI relacionado a ventos é publicado quando um ou mais dos seguintes critérios é atendido:

- DIR é alterada em 60° ou mais desde a última observação, e V é igual ou superior a 10 kt antes e/ou após a mudança,
- V muda em 10 kt ou mais desde a última observação,
- G muda em 10 kt ou mais desde a última observação, e V é igual ou superior a 15 kt antes e/ou após a mudança.

Condições gerais de tempo de interesse para análise de ventos extremos incluem tempestade elétrica (*thunderstorm* – TS), poeira generalizada (*widespread dust* – DU), areia (*sand* – SA), redemoinhos de poeira/areia (PO), rajada (*squall* – SQ), tornado/nuvem funil/tromba d'água

(*funnel cloud – FC*), tempestade de areia (*sandstorm – SS*) e tempestade de poeira (*dust storm – DS*). As condições gerais de tempo são frequentemente acompanhados por termos qualitativos, tais como leve (-), pesado (+), se o fenômeno está localizado na vizinhança (8-16 km) do aeródromo (VC) ou se ocorreu recentemente (RE). Caso não seja observado nenhum fenômeno meteorológico, o campo permanece ausente do boletim.

A temperatura do ar, T , e temperatura do ponto de orvalho, T_d , medidos em Celsius, são delimitados por “/” entre os dois campos de dois dígitos. Temperaturas negativas são indicadas pelo uso de “M” (de “menos”) antes dos dois dígitos. Por exemplo, uma temperatura de 10°C e temperatura de condensação de -2°C irá aparecer como “10/M02”. Se qualquer uma das duas temperaturas não for observada, ela deverá ser substituída por “/”, e se nenhuma temperatura for observada o campo deverá aparecer como “//”.

A pressão atmosférica ajustada para o nível do mar, QNH , é a informação final a ser extraída do boletim. O campo tem o prefixo “Q” seguido de quatro dígitos e é medido em hPa. Por exemplo, um QNH de 995 aparecerá como “Q0995”. Se nenhum QNH for observado, o campo deverá aparecer como “Q//”.

Protocolos similares são seguidos por outras nações sul-americanas que foram incluídas neste estudo, com as respectivas organizações e publicações listadas na Tabela 3.3, com a exceção de Bolívia, Guiana Francesa, Guiana e Suriname, para os quais publicações correspondentes não foram encontradas.

Tabela 3.3 – Organizações e documentos responsáveis pela definição dos protocolos de observação meteorológica em aeródromos dentro da região de estudo.

País	Organização Responsável	Nome e Número do Documento Técnico Correspondente
Argentina	SMN	Manual de Procedimientos Operativos de Meteorologia Aeronautica Parte V (SMN, 2010)
Brasil	DECEA	ICA 105-16: Códigos Meteorológicos (DECEA, 2017)
Chile	DGAC	DAP 03 07: Observaciones e Informes Meteorológicos (DGAC, 2017)
Paraguai	DINAC	DINAC R 3: Servicio Meteorológicos para la Navegación Aérea Internacional (DINAC, 2017)
Peru	MTC	RAP 303: Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea – Apéndice C (MTC, 2015)
Reino Unido	CAA	CAP 746: Requirements for meteorological observations at aerodromes (CAA, 2017)
Uruguai	DINACIA	RAU MET: Reglamento sobre el Servicio Meteorológico Aeronáutico (DINACIA, 2010)

3.1.1.2 SYNOP

Procedimentos de boletins para observações SYNOP em aeródromos brasileiros são definidos na ICA 105-16 (DECEA, 2017). Ao contrário dos boletins METAR/SPECI, os boletins SYNOP realizados a partir de EMS em terra firme, conforme identificado pelo prefixo AAXX, são inteiramente numéricos. Os campos são delimitados por espaços e o número total de campos dentro de cada boletim varia. Os primeiros quatro campos são os de maior importância para observações de vento à superfície. Os boletins SYNOP são emitidos com intervalos de 3 horas (00:00, 03:00... 21:00 UTC) e contêm *DIR* e *V*, mas não *G*. Exemplos de uma observação padrão corretamente formatada e um boletim sem observação de vento são apresentadas na Tabela 3.4.

Similar aos boletins METAR/SPECI, informações a respeito do mês e ano da observação são obtidas a partir dos dados externos ao boletim. O primeiro campo tem o formato $YYGGi_w$, onde *YY* é o dia do mês, *GG* é a hora do dia em formato 24 horas, e i_w é a unidade da observação de vento, definida como segue: $i_w = 0$ é velocidade estimada em m/s, $i_w = 1$ é velocidade medida em m/s, $i_w = 3$ é velocidade estimada em kt e $i_w = 4$ é velocidade medida em kt. O segundo campo, *Iiii* é o identificador de localização, conforme atribuído pela OMM, e é comumente chamado de SYNOP ou OMM ID. O terceiro campo contém informação relacionada à precipitação, tipo de estação, altura das nuvens e visibilidade. O quarto campo toma o formato *Nddff*, onde *N* é a cobertura total de nuvens, *dd* é a direção do vento, que deve ser multiplicada por 10 para ser convertida em graus (*dd* = 36 é norte), e *ff* é a velocidade do vento observada nas unidades determinadas por i_w . Condições calmas são representadas por *ddff* = 0000. No caso de velocidades de vento maiores que 99, um grupo opcional segue com o formato *00fff*, embora tal uso dessa convecção não tenha sido encontrado ao examinar dados sul-americanos para este estudo.

Tabela 3.4 – Boletins SYNOP com campos de observação de vento corretamente formatados.

Tipo	Data (UTC)	Exemplo	<i>DIR</i> (°)	<i>V</i> (kt)	<i>G</i> (kt)
Leitura padrão	22/06/2012	AAXX 22184 83612 32470 61906 10196...	190	6	-
Sem leitura	22/06/2012	AAXX 22213 83612 42470 5//// 1////...	-	-	-

O quinto campo contém dados de temperatura observada no formato $1s_nTTT$, onde 1 é intencionalmente usado para identificar o campo de temperatura, s_n indica o sinal da leitura de temperatura, onde $s_n = 0$ é positivo e $s_n = 1$ é negativo, e TTT representa a temperatura em incrementos de $0,1^\circ\text{C}$. No exemplo de leitura padrão exposto na Tabela 3.4, a temperatura observada é $19,6^\circ\text{C}$. O sexto campo segue o mesmo formato para temperatura do ponto de orvalho, sendo $1s_nT_dT_dT_d$. O sétimo campo está relacionado com a pressão atmosférica ao nível do mar o toma o formato $4PPPP$, onde 49927 representa $QNH = 992,7$ hPa e 40167 representa $QNH = 1016,7$ hPa. O oitavo campo contém informação a respeito da precipitação.

O nono campo é opcional e tem relação com o tempo observado no presente e/ou passado. O campo tem o formato $7wwW_1W_2$, com ww representando o fenômeno observado e W_1W_2 indicando quando ocorreu. Os códigos representando ww podem ser encontrados na Tabela 4677 da ICA 105-16 (DECEA, 2017).

3.1.2 EMS-A DO INMET

O Brasil é dividido em 10 Distritos Meteorológicos (DISME), conforme apresentado na Figura 3.4, com cada DISME responsável pelo gerenciamento e manutenção das EMS-A dentro de sua região. As primeiras estações EMS-A do INMET foram comissionadas no Rio de Janeiro e em Brasília em maio de 2000. Em maio de 2018, haviam 583 EMS-A em operação, com a grande maioria comissionada no período entre 2006 e 2008, como demonstrado na Figura 3.5. É estimado que pelo menos 40 EMS-A tenham sido comissionadas e descomissionadas durante a existência da rede.

Dados meteorológicos são transmitidos via satélite de cada EMS-A para a sede do INMET em Brasília. As observações são emitidas de hora em hora e, para cada observação horária, 17 valores são reportados para 7 parâmetros meteorológicos diferentes. Valores horários máximos e mínimos, assim como o valor instantâneo obtido na hora cheia, são reportados para temperatura, temperatura de condensação, pressão atmosférica e umidade relativa. Leituras instantâneas de radiação e a acumulação de precipitação horária também são reportadas. Para observações de vento, DIR e V são observados ao longo dos últimos 10 minutos da hora precedente, enquanto G é a rajada máxima de 3 segundos ao longo da última hora. De acordo com o INMET (2011), velocidades do vento são amostradas a 4 Hz, que então são processadas digitalmente para determinar DIR , V e G .

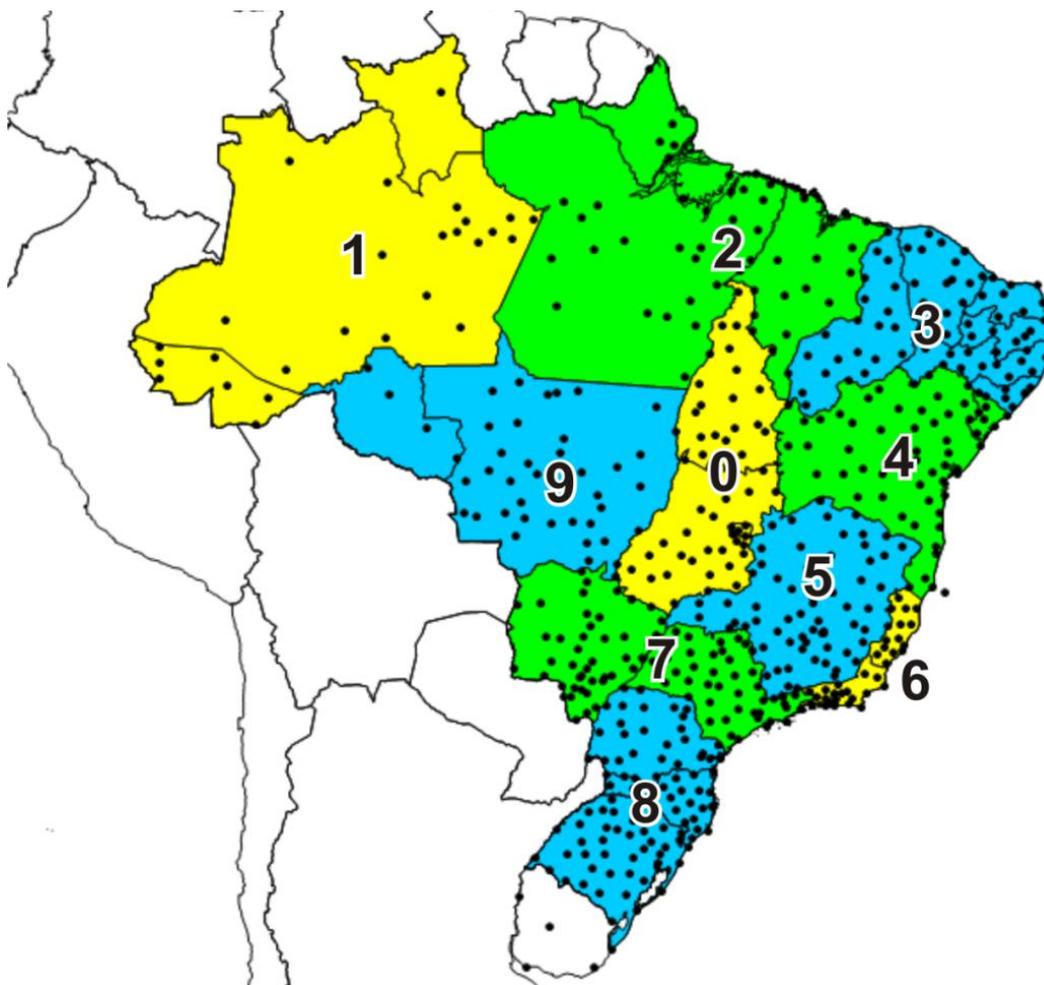


Figura 3.4 – Identificação dos DISMEs e localização das EMS-A (em maio de 2018).

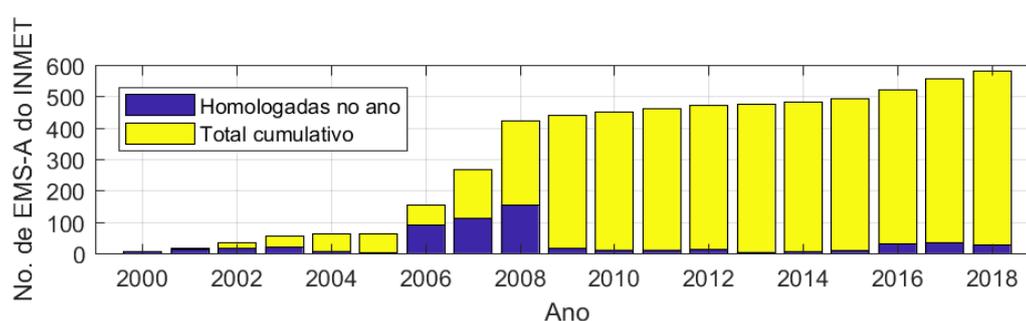


Figura 3.5 – Crescimento da rede de EMS-A do INMET.

3.2 HOMOGENEIZAÇÃO DE VELOCIDADES DO VENTO

Sem considerar o intervalo médio de recorrência, a velocidade do vento básica, V_0 , da NBR 6123 (ABNT, 1988) é definida como uma rajada de 3 segundos a uma altura de 10 m para um terreno plano em campo aberto. Segue que todas as velocidades de vento que formam o conjunto

de análise de valores extremos para determinar modelos climáticos e atualizar V_0 devam também representar as mesmas condições ($z = 10$ m, $z_0 = 0,07$ m e $\tau = 3$ s). Entretanto, não é comum que os dados observados sejam fiéis a todas as três condições e a série temporal de velocidade do vento deve ser homogeneizada. Tipo de anemômetro, processos de observação e exposição devem ser considerados ao determinar fatores de correção apropriados; entretanto, metadados históricos com alta qualidade são necessários, mas difíceis de se obter.

3.2.1 Rajadas e instrumentação

A duração de 3 segundos não era adotada como um padrão internacional pela OMM para definir rajadas pico até o início dos anos 1990. Apesar de o termo “rajada de 3 segundos” ter sido usado globalmente anteriormente aos anos 1990, era considerada a melhor estimativa representativa da duração de uma rajada usando meios convencionais e analógicos. Diferenças em rajadas pico observadas foram notadas em muitas EMS uma vez que processos digitais foram adotados, o que levou ao comissionamento de estudos para investigar as durações efetivas de rajadas de diferentes anemômetros e o efeito da adoção de uma média móvel em normas do vento.

O anemômetro de tubo de pressão de Dines era utilizado na Austrália até o início dos anos 1990, quando foi substituído pela anemometria tipo concha. Holmes e Ginger (2012) atribuíram a origem da rajada de 3 segundos na Austrália a Whittingham (1964), que afirmou que “o anemômetro de Dines dá um bom indicativo da velocidade de fortes rajadas de duração entre 2 e 3 segundos”. A transição das estações convencionais australianas para EMS-A com anemômetros concha causou uma queda notável nas rajadas pico máximas anuais. Holmes e Ginger (2012) identificaram três razões para a mudança nas amplitudes de rajada pico:

1. A duração efetiva dos anemômetros de tubo de pressão de Dines era determinada como sendo equivalente a uma média móvel da rajada de 0,2 segundos,
2. Anemômetros concha, como todos anemômetros rotatórios, filtram conteúdo de alta frequência de acordo com a função de transferência dada na Equação 3.1. A constante de distância, d , em metros, é a distância que um fluido deve viajar após passar pelo sensor para causá-lo a registrar uma velocidade de 63% do fluxo de fluido real. Para conchas pesadas com alta inércia, d também é alto. O Synchronac 706, utilizado na

Austrália, é um dos tais anemômetros, com d estimado de 13 m (Holmes e Ginger, 2012).

$$|H_1(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi f d}{\bar{u}}\right)^2} \quad 3.1$$

Onde,

$|H_1(f)|^2$: função de admitância do anemômetro

f : frequência, Hz

Em dois formatos, a Figura 3.6 ilustra a função de admitância para quatro diferentes constantes de distância a $\bar{u} = 20$ m/s. A filtragem do sinal começa a frequências mais altas para d baixas, e a baixas frequências para d altas, o que significa que anemômetros pesados e de resposta lenta são incapazes de capturar flutuações de frequências mais altas.

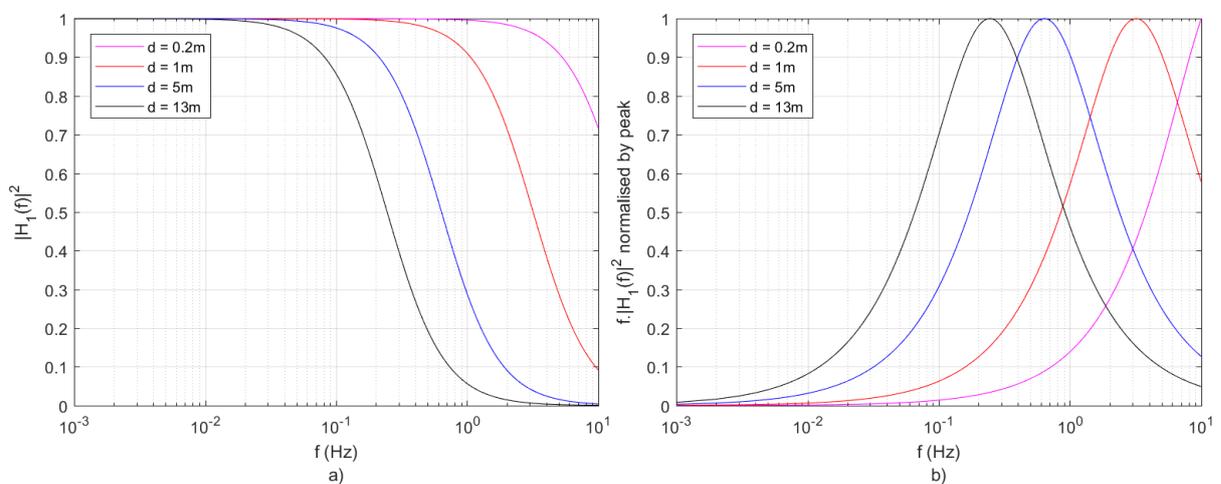


Figura 3.6 – Função de admitância de um anemômetro para várias constantes de distância, d .

3. A aplicação de uma média móvel de 3 segundos filtra frequências acima de 0,2 Hz, e suprime completamente frequências que coincidem com múltiplos de 0,33 Hz. A formulação do filtro no domínio da frequência é dada na Equação 3.2, e uma ilustração é dada na Figura 3.7 para quatro diferentes intervalos de média, τ .

$$|H_2(f)|^2 = \left(\frac{\sin(f\pi\tau)}{f\pi\tau}\right)^2 \quad 3.2$$

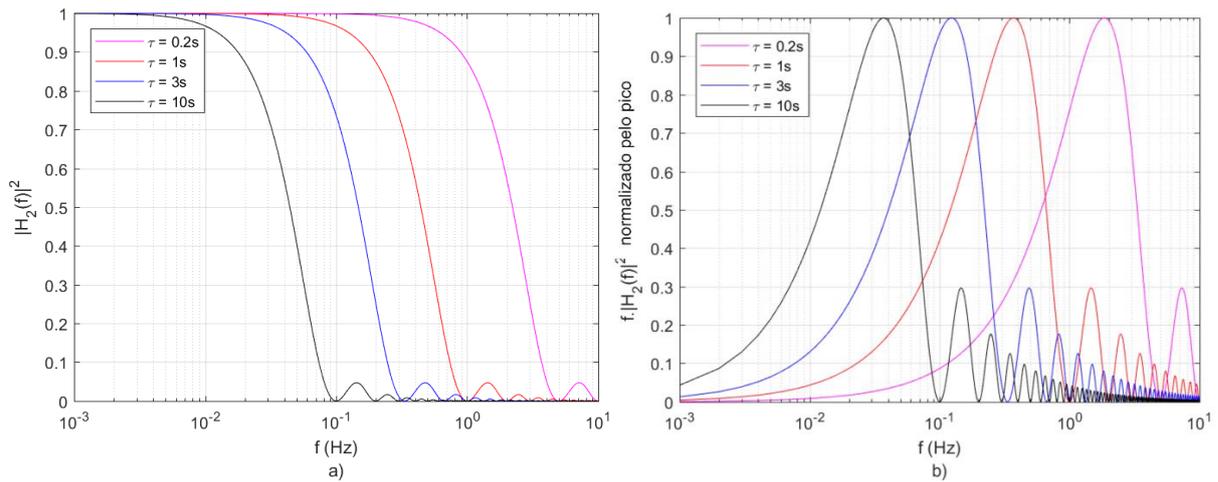


Figura 3.7 – Filtro de média móvel em domínio de frequência para vários intervalos de tempo, τ .

Com isso, estabeleceu-se que dados de vento adquiridos nas EMS-A australianas dos anos 1990 em diante estariam sujeitos à dupla filtragem: de uma média móvel e da admitância do anemômetro, expressa em uma forma única pela Equação 3.3. Dado que as então atuais velocidades básicas de vento da AS/NZS 1170.2 (2002) eram baseadas em dados adquiridos por anemômetros de tubo de pressão de Dines, a rajada pico foi redefinida como sendo uma rajada de média móvel de 0,2 segundos (Holmes e Ginger, 2012; AS/NZS, 2011).

$$|H(f)|^2 = |H_1(f)|^2 |H_2(f)|^2 \quad 3.3$$

Fatores de correção foram derivados por Ginger e Holmes (2012) para converter rajadas observadas adquiridas nas EMS-A australianas mais novas com anemômetros concha em uma rajada de 0,2 segundos, com o intuito de auxiliar futuras pesquisas. Com a aplicação de funções de transferência à densidade espectral de turbulência de vento, fatores de pico esperado e rajada foram então determinados com a aplicação da teoria de processo aleatório. O efeito de filtragem das funções de transferência das Equações 3.1, 3.2 e 3.3 para os espectros de turbulência de von Kármán da Equação 2.7 é apresentado na Figura 3.8 para $\bar{u} = 20$ m/s, $L_u = 85$ m, $d = 13$ m, $I = 20\%$, $T = 600$ s e $\tau = 3$ s. De modo a evitar a perda do desvio padrão, uma frequência teórica de amostragem de $f = 100$ Hz é utilizada.

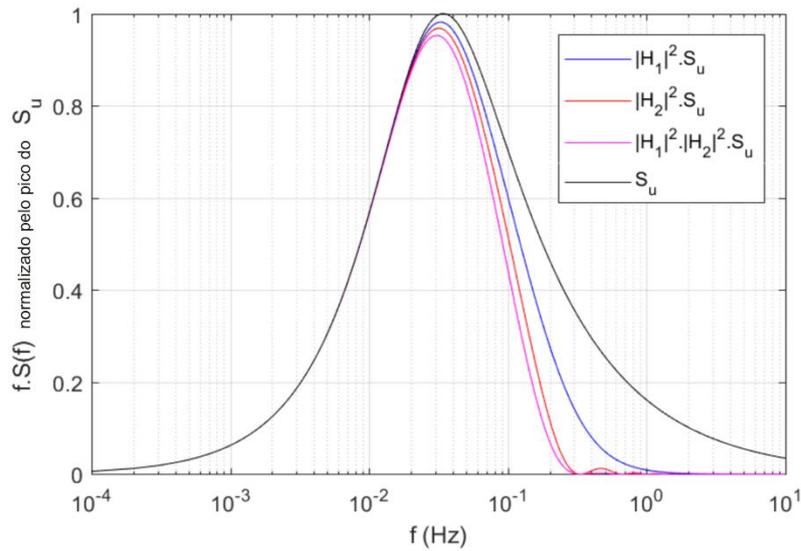


Figura 3.8 – Efeito de filtragem em espectros de turbulência, S_u .

A taxa de ciclo, ν , é calculada a partir da Equação 3.4 e o fator de pico esperado, g , é calculado usando a equação de forma fechada de Davenport (1964) para processos gaussianos, conforme apresentado na Equação 3.5. Para o mesmo conjunto de parâmetros usado para gerar a Figura 3.8, um exemplo é dado na Tabela 3.5. Note que os fatores de pico são reescalados de acordo com a diferença no desvio padrão entre os processos filtrados e não filtrados (Holmes et al., 2014). No caso apresentado, a média móvel de $\tau = 0,2$ s gera um $G_V = 1,670$, enquanto espectros filtrados por anemômetros concha pesados e uma média móvel de $\tau = 3$ s geram $G_V = 1,483$ – o que significa que um fator de correção de 1,13 deve ser aplicado ao segundo caso para ajustar para rajadas de média móvel de $\tau = 0,2$ s. O efeito de um anemômetro com baixa d (2 m) é mínimo com relação à filtragem da média móvel de $\tau = 0,3$ s, conforme apresentado na Tabela 3.5. Os fatores podem ser determinados pelo mesmo processo para diferentes combinações de \bar{u} e I .

$$\nu = \left(\frac{\int_0^\infty f^2 \cdot S_u(f) \cdot |H(f)|^2}{\int_0^\infty S_u(f) \cdot |H(f)|^2} \right)^{1/2} \quad 3.4$$

$$g = \sqrt{2 \ln(\nu T)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(\nu T)}} \quad 3.5$$

Tabela 3.5 – Cálculo dos fatores de pico esperado e de rajada para espectros de turbulência filtrados.

Caso	Espectros	Desvio padrão, σ (m/s)	Taxa de ciclo, ν (Hz)	Fator de pico esperado, g	Fator de rajada, G_V
Apenas espectro de turbulência	S_u	4,0	3,9389	4,1399	1,828
Filtros: Concha ($d=13m$) e média móvel ($\tau=3s$)	$ H_1 ^2 \cdot H_2 ^2 \cdot S_u$	3,3144	0,0531	2,4149	1,483
Filtro: Média móvel ($\tau=0,2s$)	$ H_2 ^2 \cdot S_u$	3,8774	0,3653	3,4094	1,682
Filtros: Concha ($d=2m$) e média móvel ($\tau=3s$)	$ H_1 ^2 \cdot H_2 ^2 \cdot S_u$	3,3890	0,0621	2,5144	1,503
Filtro: Média móvel ($\tau=3s$)	$ H_2 ^2 \cdot S_u$	3,3916	0,0654	2,5314	1,506

O intervalo de média da rajada está relacionado com a área frontal efetiva, ou área equivalente, A , sobre a qual se assume a ação de um redemoinho turbulento. A função de admitância aerodinâmica proposta por Vickery (1968), apresentada na Equação 3.6, varia com a velocidade média do vento e área equivalente. Ao seguir o mesmo procedimento utilizado para determinar os fatores de pico esperados para a admitância mecânica e filtros de média móvel, os fatores de pico também podem ser determinados para a função de admitância aerodinâmica. Ao combinar os fatores de pico determinados por $|H_A|^2 \cdot S_u$ e $|H_2|^2 \cdot S_f$, A pode ser obtido para uma combinação particular de \bar{u} e τ . Isso foi realizado por Holmes et al. (2014) e replicado na Figura 3.9 para $\tau = 0,2, 1$ e 3 s e \bar{u} variando entre 10 e 30 m/s ($T = 3.600$ s, $I = 0,2$). Para $\bar{u} = 30$ m/s e $\tau = 3$ s, $A = 3.200$ m², o que iguala a um prédio de altura $h = 100$ m e largura frontal de 32 m. Para a mesma velocidade do vento média, a área difere imensamente para médias de rajada mais curtas, com $A = 16$ m² e 350 m² para $\tau = 0,2$ e 1 s, respectivamente. Isso implica que pressões determinadas por uma velocidade de projeto do vento de $\tau = 3$ s são inadequadas para pequenas estruturas utilizando o princípio quase-estacionário, e um fator de efeito de rajada superior a 1 é necessário em tais casos.

$$|H_A(f)|^2 = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2f\sqrt{A}}{\bar{u}}\right)^{4/3}\right]^2} \quad 3.6$$

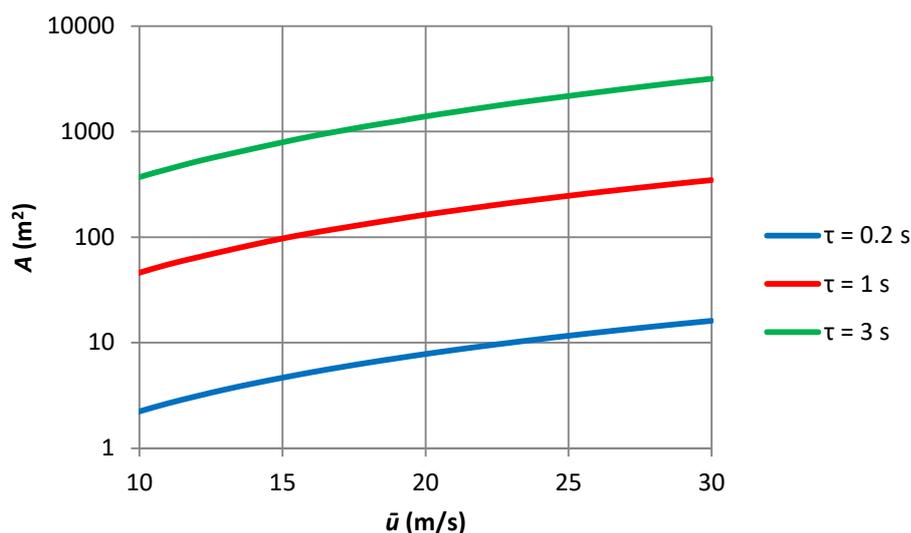


Figura 3.9 – Área equivalente frontal, A (m^2), para diversos intervalos de média de rajada.

Investigações similares sobre a duração efetiva de rajada foram realizadas nos sistemas de observação dos Estados Unidos. Rajada pico efetiva e velocidades de vento médias na ASCE 7 de 1995 a 2016 são $\tau = 3$ s e $T = 3600$ s, respectivamente. De acordo com Kwon e Kareem (2014), o anemômetro concha F420C foi utilizado para registrar velocidades de vento que foram usadas na confecção do primeiro mapa eólico baseado em rajadas pico da ASCE 7 (1995). O sistema de anemógrafo era composto pela concha rotatória, com $d = 9,14$ m, e por um mecanismo de registro de gráficos. O mecanismo de registro introduziu um filtro adicional ao sistema de registro, como dado na Equação 3.7, dependente do tempo de resposta, $t_r = 0,2$ s. Utilizando um processo similar ao de Holmes e Ginger (2012), foi determinado que as rajadas pico medidas pelo sistema representavam um intervalo de média móvel de $\tau = 1$ s, e revisões da ASCE 7 (2010) foram propostas por Kwon e Kareem (2014).

$$|H_3(f)|^2 = \frac{1}{1 + (2f\pi t_r)^2} \quad 3.7$$

As características de resposta de anemômetros em operação na Nova Zelândia foram avaliadas por Pirooz e Flay (2018). Os tipo concha MK II ($d = 14,3$ m) operavam como um anemógrafo com registro de gráficos até serem substituídas pelos anemômetros de conchas com registros digitais mais leves, Vector A101, $d = 2,4$ m, e Vaisala WAA151, $d = 1,3$ m (Pirooz e Flay 2018), nos anos 1990. As respostas de todos os três anemômetros foram

testadas em túnel de vento por um período de $T = 600$ s para $\bar{u} = 13$ m/s e $I = 0,145$. Em média, os concha Vector A101 e Vaisala WAA151 registraram rajadas brutas 7-13% e 9-15% mais altas que as registradas pelo concha MK II, respectivamente. Ao considerar o filtro da média móvel de $\tau = 3$ s, as diferenças foram 2-6% para Vector A101/MK II e 1-6% para Vaisala WAA151/MK II. As diferenças nos fatores de pico e de rajada sobre diversos intervalos de tempo de média para os três anemômetros concha são apresentadas na Figura 3.10. Geralmente, existe uma boa concordância entre os dois concha mais leves; entretanto, o mais pesado concha MK II tende a subestimar as velocidades de rajada.

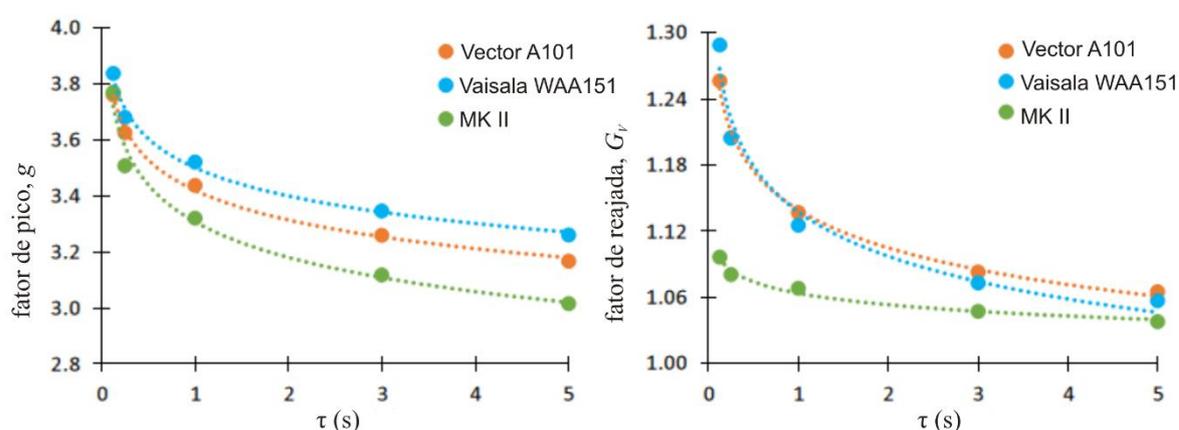


Figura 3.10 – Comparação entre fatores de pico e fatores de rajada obtidos em testes controlados de túnel de vento para os três diferentes anemômetros concha (adaptado de Pirooz e Flay, 2018).

A importância de conduzir experimentos para comparar com modelos teóricos é destacada pelos resultados de Pirooz e Flay (2018). Para $\tau = 3$ s, os fatores de rajada teóricos esperados para ventos de escala real de $L_u = 85$ m são $G_V = 1,347$ ($d = 14,3$ m), $1,370$ ($d = 2,4$ m), $1,371$ ($d = 1,3$ m) e $1,373$ ($d = 0$ m). Estes variam significativamente daqueles da Figura 3.10 entre $1,06$ ($d = 14,3$ m) e $1,10$ ($d = 2,4$ m) devido à menor escala de comprimento integral de $L_u = 0,7$ m do túnel de vento (Pirooz, 2019), que vai de encontro aos fatores de rajada teóricos para $L_u = 0,7$ m de $1,07$ ($d = 14,3$ m) a $1,09$ ($d = 2,4$ m).

Seguindo o mesmo procedimento de Holmes e Ginger (2012) e Holmes et al. (2014), como delineado acima, os fatores de rajada da NBR 6123 (ABNT, 1988) são examinados. Estabeleceu-se na Seção 2.3.1.3 *Caraterísticas do vento* que os fatores de rajada da NBR 6123 foram baseados em Durst (1960), que a intensidade de turbulência é $I = 0,197$ a $z = 10$ m para CAT II ($z_0 = 0,07$ m), e que o espectro de turbulência é baseado em Harris (1968; apud

Blessman, 2013). Uma análise foi realizada para $\bar{u} = 20$ m/s e $I = 0,197, 0,169, 0,13$ e $0,1$ ao longo dos vários τ utilizados pela NBR 6123. Fatores de pico, g , fatores de rajada, G_V , e a versão do fator de rajada da NBR 6123, F_r , para a análise são mostrados na Tabela 3.6. Ambas versões do fator de rajada, G_V e F_r , são plotadas na . Os fatores de rajada também foram testados em intervalos de 5 m/s até $\bar{u} = 40$ m/s com variação insignificante.

Idealmente, o conjunto de fatores de rajada conforme determinado pela análise para $I = 0,197$ deveria ser o mesmo que aqueles da NBR 6123 (ABNT, 1988), mas esse não é o caso. Sendo que a velocidade básica do vento na NBR 6123 é definida para $\tau = 3$ s, um ajuste dos fatores de rajada para $I = 0,197$ de acordo com essa análise resultaria no decréscimo das velocidades de projeto do vento em $T = 600$ s e 3600 s de aproximadamente 4,5%. Os fatores de rajada da NBR 6123 se ajustam melhor com os fatores de rajada gerados pela análise para $I = 0,169$, o que concorda com Holmes et al. (2014) na conclusão de que os fatores de rajada de Durst (1960) estão ligados a uma intensidade de turbulência de $I = 0,165$ e não devem ser utilizados como uma curva universal. Nota-se que a série de fatores de pico, g , permaneceu constante para todas as quatro intensidades de turbulência analisadas. Para baixa intensidade de turbulência, $I = 0,1$, a diferença entre os fatores de rajada para $\tau = 3$ s e aqueles de períodos de média mais longos é reduzida, como esperado. Um ajuste dos fatores de rajada da NBR 6123 para $I = 0,1$ resultaria no acréscimo das velocidades de projeto do vento em $T = 600$ s e 3600 s de aproximadamente 15% e 17%, respectivamente.

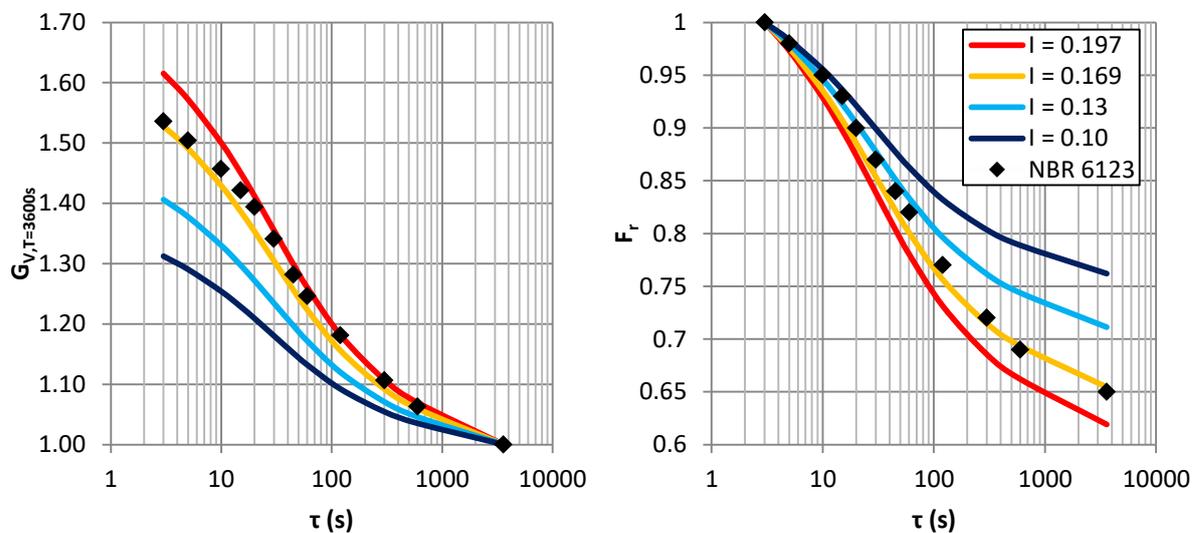


Figura 3.11 – Comparação dos fatores de rajada da NBR 6123 com aqueles calculados pela análise espectral.

Tabela 3.6 – Comparação entre fatores de pico e de rajada da NBR 6123 (ABNT, 1988) e do espectro de turbulência de Holmes et al. (2014).

τ (s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
NBR 6123 (ABNT, 1988) – $I = 0,197$, $\bar{u} = 20$ m/s												
F_r	1	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
g (= c)	2,72	2,56	2,32	2,14	2,00	1,73	1,43	1,25	0,92	0,54	0,32	0
G_V	1,54	1,51	1,46	1,42	1,39	1,34	1,28	1,25	1,18	1,11	1,06	1
Método de Holmes et al. (2014) – $I = 0,197$, $\bar{u} = 20$ m/s												
F_r	1	0,97	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80	0,78	0,73	0,69	0,66	0,62
g	3,12	2,91	2,54	2,29	2,09	1,80	1,52	1,32	0,92	0,54	0,35	0
G_V	1,62	1,57	1,50	1,45	1,41	1,36	1,30	1,26	1,18	1,11	1,07	1
Método de Holmes et al. (2014) – $I = 0,169$, $\bar{u} = 20$ m/s												
F_r	1	0,98	0,94	0,91	0,89	0,85	0,82	0,80	0,76	0,71	0,69	0,65
g	3,12	2,91	2,54	2,29	2,09	1,80	1,52	1,32	0,92	0,54	0,35	0
G_V	1,53	1,49	1,43	1,39	1,35	1,30	1,26	1,22	1,16	1,09	1,06	1
Método de Holmes et al. (2014) – $I = 0,13$, $\bar{u} = 20$ m/s												
F_r	1	0,98	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,83	0,80	0,76	0,74	0,71
g	3,12	2,91	2,54	2,29	2,09	1,80	1,52	1,32	0,92	0,54	0,35	0
G_V	1,41	1,38	1,33	1,30	1,27	1,23	1,20	1,17	1,12	1,07	1,05	1
Método de Holmes et al. (2014) – $I = 0,10$, $\bar{u} = 20$ m/s												
F_r	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,83	0,80	0,79	0,76
g	3,12	2,91	2,54	2,29	2,09	1,80	1,52	1,32	0,92	0,54	0,35	0
G_V	1,31	1,29	1,25	1,23	1,21	1,18	1,15	1,13	1,09	1,05	1,04	1

Cada um dos três principais tipos de anemômetros, concha, hélice e ultrassônico, tem suas vantagens e desvantagens operacionais. Com partes móveis e rolamentos, hélices e conchas necessitam de manutenção regular e calibração para evitar o desgaste e a potencial redução de sinal. Hélices são leves, mas tentem a subestimar baixas velocidades de vento e superestimar altas rajadas devido à alta inércia (ESDU, 1990[a]). Anemômetros de concha também podem superestimar velocidades médias de vento pela desaceleração atrasada do mecanismo de rotação após a redução da velocidade do vento. Anemômetros giratórios também encaram a possibilidade de congelamento quando utilizados em ambientes expostos a temperaturas abaixo de 0°C. Anemômetros ultrassônicos medem o tempo entre a emissão e recepção de um pulso ultrassônico ao longo de uma distância fixa para calcular a velocidade do vento e, uma vez que não existem componentes móveis, eles oferecem a possibilidade de melhor precisão e minimizam as demandas de manutenção.

Resultados de estudos comparando anemômetros ultrassônicos com anemômetros mecânicos tradicionais indicam velocidades observadas de vento superiores para o anemômetro ultrassônico e, apesar das vantagens teóricas dos anemômetros ultrassônicos sobre os de concha e hélice serem atraentes, alguns resultados colocam a confiança da tecnologia em

dúvida. Ao comparar o anemômetro ultrassônico aquecido Vaisala 425 AH com o Climet tipo hélice (Wastrack, et al., 2000), o ultrassônico continuou em funcionamento normal durante condições de congelamento enquanto o hélice não; entretanto, suspeita-se que um sinal eletromagnético aleatório causou as amostras do ultrassônico a mudarem de mph para nós durante testes in-situ. Gilhousen (2001 apud Bowen, 2008) encontrou uma forte correlação entre os anemômetros ultrassônicos Gill 2D e um tipo hélice em dois locais costeiros e uma bóia para ventos abaixo de 15 m/s; entretanto, velocidades do vento medidas pelo anemômetro ultrassônico foram 10% mais elevadas que os dados do hélice durante vendavais. O anemômetro ultrassônico também forneceu medição irreal de velocidade do vento durante tempestades de raios, durante e após precipitação de chuva ou neblina. Gorman (2004) notou que o anemômetro ultrassônico RM Young Model 8199 3D produziu artificialmente altas velocidades de vento em condições de chuva ao testar a calibração do anemômetro concha Synchrotac 706, e conseqüentemente descartou dados afetados por chuva adquiridos a partir da análise. Short et al. (2006) observaram um aumento nas velocidades pico de vento nos anemômetros ultrassônicos Vaisala WS425 ao compará-los com anemômetros mecânicos. Realizando testes em condição de campo no Centro de Lançamento de Alcântara, no Brasil, Fisch (2010) descobriu que o anemômetro ultrassônico Vaisala WS425 produzia velocidades médias e máximas de vento maiores, em 0,5 m/s e 1,0 m/s, respectivamente, quando comparado com o RM Young Model 05305 tipo hélice.

Em 2007, uma investigação detalhada foi conduzida pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA*) sobre a performance de anemômetros ultrassônicos do Sistema Automático de Observação à Superfície (*Automatic Surface Observing System – ASOS*) dos EUA, que começou a atualizar a anemometria das estações do tipo concha Belfort Model 2000 para o Vaisala 425NWS Ice Free Wind Sensor em agosto de 2005 (NOAA, 2008). Em outubro de 2007, apenas 183 dos 883 locais ainda precisavam ser atualizados para o sensor ultrassônico. Um aumento expressivo no número de mensagens de erro por estação foi percebido em meados de 2007, tendo a forma de dados faltantes ou rajadas pico errôneas e extraordinariamente altas. A investigação subsequente descobriu que, junto ao congelamento do anemômetro devido a falha no elemento de aquecimento, pássaros eram o principal motivo do alto número de erros. Schmitt (2008) notou que as amostras corrompidas resultaram em rajadas pico falsas que podiam exceder 100 kt em um dia calmo. Atualizações no *software* de aquisição para identificar erros antes da emissão de boletins (Schmitt, 2008) e dispositivos aperfeiçoados

para pássaros, como a instalação de poleiros adjacentes ao anemômetro, foram implementadas para reduzir o número de erros (NOAA, 2008). Problemas relacionados a pássaros também foram documentados por Wauben (2012), que descobriu que pássaros bloqueavam temporariamente o caminho de medição dos sensores, além de infligirem dano permanente ao Thies 2D ultrassônico na Holanda.



Figura 3.12 – Pássaros empoleirados em anemômetros ultrassônicos (esquerda – NOAA, 2008; direita – Schmitt, 2008).

3.2.2 EXPOSIÇÃO

A altura e o ambiente ao redor do anemômetro, suas condições de exposição, impactam fortemente nas suas observações. A OMM (2014) define três fatores para a correção de velocidades de vento observadas, u_{obs} , com exposição de rugosidade, $z_{0,obs}$, à altura z m para uma rugosidade padrão de $z_{0,cor}$ e altura de 10 m para ventos sinóticos.

$$u_{cor} = u_{obs} \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln(10/z_{0,obs}) \ln(60/z_{0,obs}) \ln(10/z_{0,cor})}{\ln(z/z_{0,obs}) \ln(10/z_{0,obs}) \ln(60/z_{0,cor})} \quad 3.8$$

Onde,

C_F : fator de correção da distorção de escoamento;

C_T : fator de correção devido a efeitos topográficos;

$z_{0,obs}$: comprimento de rugosidade efetivo do terreno a barlavento do local da medição.

O fator de correção, C_F , leva em conta a distorção do escoamento devido a grandes obstáculos próximos, tais como construções, e é uma função da direção do vento, com sua melhor

estimativa calculada através de modelagem em túnel de vento. O fator topográfico, C_T , também é uma função da direção do vento e considera as mudanças da topografia no entorno do anemômetro – o vento acelera sobre o topo de colinas e montanhas e, conseqüentemente, $C_T > 1$; terrenos planos têm $C_T = 1$; e em vales profundos, $C_T < 1$. A modelagem em túnel de vento é a forma mais apropriada de determinar o C_T por direção em um dado local, embora estudos mais teóricos possam ser conduzidos utilizando abordagens simplificadas como a 5.2 Fator topográfico, S_I da NBR 6123 (ABNT, 1988). Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) foi utilizada por Turner et al. (2019) para determinar fatores de correção topográficos no anemômetro do Aeroporto Internacional de Wellington, Nova Zelândia, e em outro anemômetro localizado no topo de uma colina de uma ilha, parte do grupo de ilhas Os Irmãos, no Estreito de Cook. O aeroporto está sujeito a redemoinhos turbulentos vindos de colinas localizadas 2 km a oeste, como apresentado na Figura 3.13, que também mostra os fatores direcionais divisionais, variando de 1,5 a 0,85, que contabilizam a velocidade de vento para cima devido ao aclave acentuado no local do anemômetro de Os Irmãos.

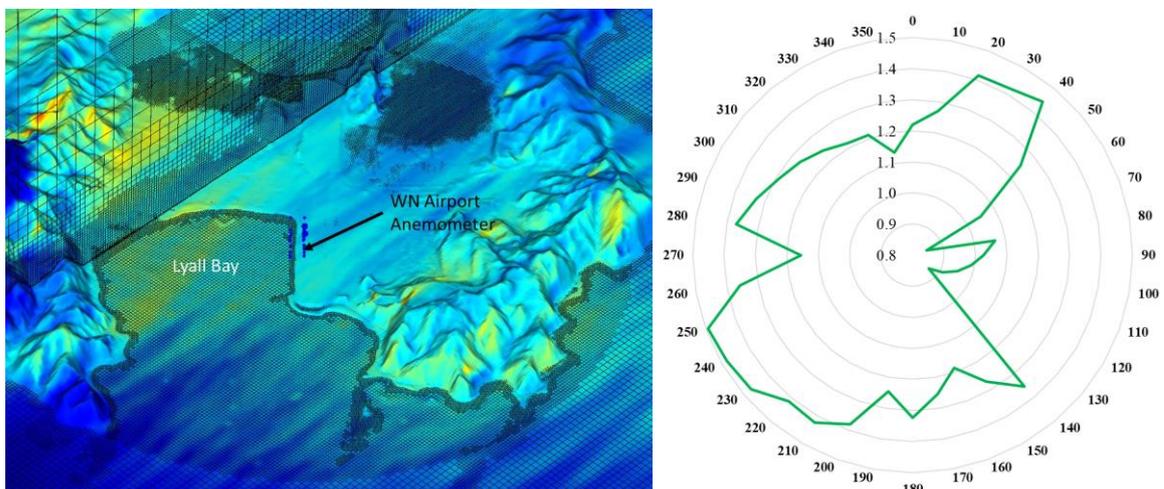


Figura 3.13 – Uso de DFC para determinar fatores de correção topográficos (Turner et al., 2019). Esquerda: domínio da DFC ao redor do Aeroporto Internacional de Wellington. Direita: fatores de correção topográficos em Os Irmãos, Nova Zelândia.

Grande parte das análises que visam homogeneizar velocidades de vento observadas foca na estimativa da exposição do local, $z_{0,obs}$, da Equação 3.8. As metodologias para sua determinação são muitas e podem gerar resultados muito diferentes, particularmente a baixas alturas como $z = 10$ m. A forma mais simples e pragmática de abordagem é através da atribuição de valores padrão de z_0 por meio de inspeção visual do terreno – tipicamente a

partir de fotografias aéreas. Uma lista de categorias de terreno e seus respectivos comprimentos de rugosidade de acordo com a OMM (2014) é dada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Classificação de terreno da OMM (2014) em termos do comprimento de rugosidade z_0 (baseado em Davenport, 1960; Wieringa, 1980).

Índice de classe	Descrição do terreno	z_0 (m)
1	Mar aberto, distância de no mínimo 5 km	0,0002
2	Lamaçais, neve; sem vegetação, sem obstáculos	0,005
3	Terreno plano aberto; gramado, poucos obstáculos isolados	0,03
4	Plantações baixas; obstáculos grandes ocasionais, $x/H > 20$	0,10
5	Plantações altas; obstáculos dispersos, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Árvores dispersas, moitas; obstáculos numerosos, $x/H \sim 10$	0,5
7	Cobertura média de grandes obstáculos (subúrbio, floresta)	1,0
8	Centro de cidade com construções altas e baixas	≥ 2

Obs.: x é a distância típica em direção ao vento e H é a altura correspondente dos maiores obstáculos.

Caso essa abordagem simplificada seja adotada, deverá ser definida uma distância de incidência do vento (*fetch length*) apropriada. Wieringa (1980), também responsável pela Equação 3.8, recomendou uma distância de 2 km para a análise. As críticas ao método de Wieringa (1980) da Equação 3.8, apoiado pela OMM, incluem a negligência da mudança da velocidade de atrito, u^* , entre os dois terrenos vizinhos, e a suposição de que a velocidade média do vento se mantém inalterada a uma altura de $z = 60$ m. Essas não são boas hipóteses para ventos de CLA, e seria melhor assumir que o vento é invariante a uma altura gradiente, z_g .

Holmes et al. (2018) usaram uma distância a barlavento de 500 m ao analisar terrenos para aplicação de ventos sinóticos e não-sinóticos. A AS/NZS 1170.2 (2011) originalmente recomendava uma distância média a barlavento da estrutura de 1 km para estruturas de $h < 50$ m. Uma emenda alterou essa distância para o maior valor entre 40 vezes a altura da estrutura e 500 m.

Distâncias de incidência a barlavento raramente são homogêneas e, tipicamente, quanto mais longo o caminho percorrido, maior o número de mudanças nas categorias de terreno. Campos abertos em regiões de aeroportos são tipicamente rodeadas por ambientes industriais, suburbanos, de águas abertas e, em alguns casos, com altas construções urbanas. Deaves (1981) propôs um modelo de camada limite interna que foi adotado pela NBR 6123 (ABNT,

1988). Qualquer combinação de x e z , conforme a Figura 3.14, está localizada em uma de três regiões:

1. Para $x < 0$ ou $z > z_t(x)$, o escoamento a barlavento fica inalterado e permanece em equilíbrio com o perfil determinado pelo comprimento de rugosidade z_0' ;
2. Para $x > 0$ e $z_i(x) < z < z_t(x)$, o escoamento está na região de transição onde não existe equilíbrio com z_0 a barlavento nem a sotavento de $x = 0$, mas deve ser uma transição suave entre os dois perfis;
3. Para $x > F$ ou $0 < z < z_i(x)$, equilíbrio com o perfil determinado pelo novo comprimento de rugosidade z_0 .

Como demonstrado na Figura 3.14, o novo perfil, ou perfil a jusante, ‘cresce’ da superfície para cima e a camada é mais espessa quanto mais distante a sotavento do ponto de transição.

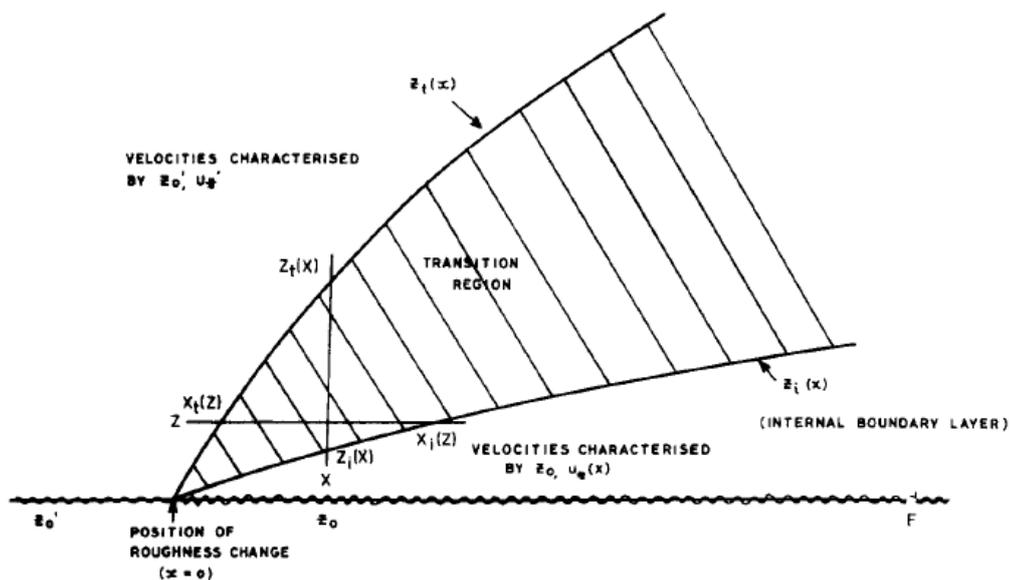


Figura 3.14 – Crescimento da camada limite interna devido à mudança de rugosidade (Deaves, 1981).

De acordo com Deaves (1981), a Equação 3.9 determina a altura da camada de transição, z_t , a uma distância x da mudança no terreno, onde z_0^+ é o maior dos dois comprimentos de rugosidade. Para transições de liso para rugoso (L-R), a altura da camada interna é calculada pela Equação e, para transições de rugoso para liso (R-L), a Equação é utilizada.

$$z_t = 10z_0^+(x/z_0^+)^{0,6} \quad 3.9$$

$$z_i = 0,36z_{02}(x/z_{02})^{0,75} \quad 3.10$$

$$z_i = 0,07x(z_{02}/z_{01})^{0,5} \quad 3.11$$

O método utilizado na NBR 6123 para determinar o multiplicador de terreno e altura, S_2 , afetado pela mudança do terreno, é fortemente baseado em Deaves (1981). Abordagens diferentes são necessárias para transições L-R e R-L, com exemplos ilustrativos dados na Figura 3.15. z_x , o equivalente de z_t de Deaves (1981), é calculado utilizando a Equação 3.12, com A definido pela Equação , para transições L-R, e pela Equação para transições R-L. A altura máxima da camada limite interna para transições L-R, z_i , é definida pela Equação . Para transições R-L, z_i é a altura na qual $S_2(z_i) = S_2(z_x)$. Utiliza-se interpolação linear para a zona de transição entre z_x e z_i para ambas transições.

$$z_x = Az_{02}(x/z_{02})^{0,8} \quad 3.12$$

$$A = 0,63 - 0,03\ln(z_{02}/z_{01}) \quad 3.13$$

$$A = 0,73 - 0,03\ln(z_{01}/z_{02}) \quad 3.14$$

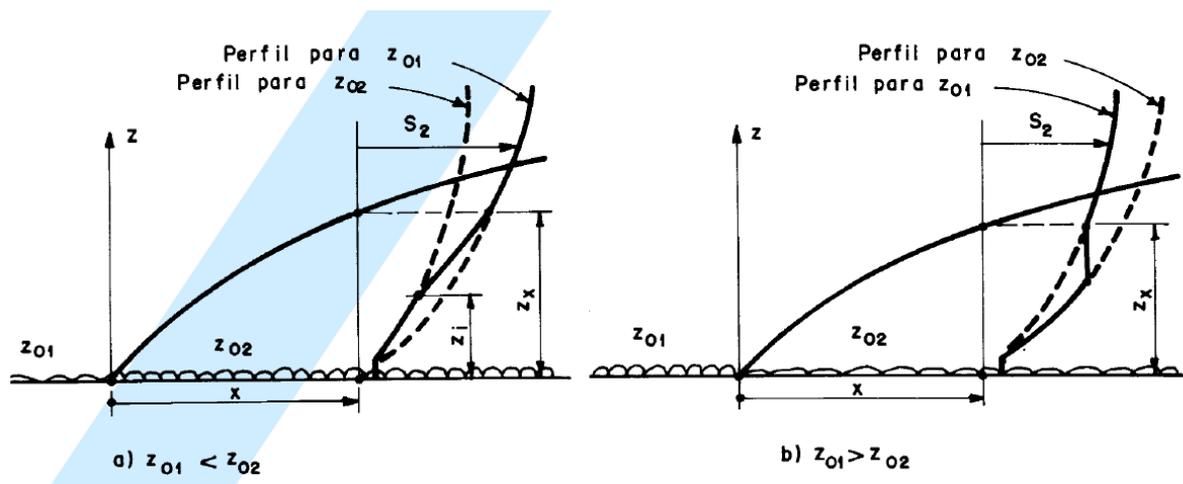


Figura 3.15 – a) Transição de liso para rugoso, b) Transição de rugoso para liso da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Assumindo-se que um anemômetro é instalado a $z = 10$ m em terreno com $z_0 = 0,07$ m, correspondente a V_0 da NBR 6123 (ABNT, 1988), a transição R-L mais severa seria a partir da CAT V de $z_0 = 2,5$ m. Uma análise simples é realizada para determinar a distância mínima a barlavento, x , que deve ser de CAT II entre o fim da CAT V e o anemômetro para que a

camada limite interna seja totalmente desenvolvida para CAT II, $z_{01} = 2,5$ m, $z_{02} = 0,07$ m, $z_i = 10$ m e $S_2(z_i) = S_2(z_x) = 1,0$. A Equação 2.13 é rearranjada para resolver z_x para $S_2 = 1,0$ com os correspondentes parâmetros de CAT V $b = 0,74$ e $p = 0,15$, resultando em $z_x = 74$ m. A Equação 3.12 é, então, rearranjada para tornar-se função de z_x e resolvida para $z_x = 74$, retornando $x = 768$ m. Entretanto, a Equação de Deaves (1981) para transição R-L com $z_i = 10$ m resulta em $x = 84$ m. Desse modo, a diferença entre os dois métodos é da ordem de 10.

O método da ESDU 82026 (2002) para a determinação do perfil vertical de velocidade do vento considera múltiplas mudanças no terreno. Ele foi utilizado na derivação das velocidades básicas do vento regionais irlandesas (Departamento do Meio Ambiente, Patrimônio e Governo Local, 2009) para distâncias de incidência do vento de 40 km. No caso de considerar-se apenas uma única mudança no terreno, a camada limite interna, V_{zx} , do novo terreno, z_{02} , tem altura $h_{i,A}$ no ponto A, conforme mostrado na Figura 3.16. Para altura superior a $h_{i,A}$, o perfil de velocidades do vento, V_{z1} , segue aquele definido pelo terreno a barlavento. Até a camada limite interna atingir um perfil completamente desenvolvido para z_{02} , V_{z2} , a uma certa distância, $h_{i,A}$ continua a crescer e o perfil da camada limite interna, V_{zx} , é definido pela Equação 3.15. K_x é um fator multiplicador que é aplicado ao perfil completamente desenvolvido, V_{z2} , e se aplica para toda a região de $0 < z < h_{i,A}$, e varia para L-R e R-L, como apresentado nas Equações 3.16 e 3.19, respectivamente. f é calculado para L-R (Equações 3.17 e 3.18) e R-L (Equações 3.20 e 3.21), enquanto a definição de R pode ser encontrada na ESDU 82026 (2002) e é uma função de outros parâmetros. Para V_{zx} estar completamente desenvolvido, $K_x = 1$, o que só ocorre quando R , f_{LR} ou $f_{RL} = 0$. $R = 0$ apenas quando z_{01} e z_{02} são iguais (ou seja, sem mudança no terreno), $f_{LR} = 0$ quando $x \geq 316$ km, e $f_{RL} = 0$ quando $x \geq 398$ km. No caso de $x = 10$ km de terreno CAT II após um comprimento infinito de CAT V localizado na região sul do Brasil, $z_{01} = 2,5$, $z_{02} = 0,07$, $R = 0,62$ e $f_{RL} = 0,58$ ($X = 4$), resultando em $K_x = 0,85$. Isso significa dizer que, após 10 km de terreno CAT II, as velocidades do vento na camada limite interna são apenas 85% de um perfil de CAT II. Pode-se argumentar que não há terreno de CAT V infinito, e um exercício similar é realizado para uma mudança de CAT I para CAT II, resultando em um perfil 105% CAT II calculado a $x = 10$ km.

$$V_{zx} = K_x V_{z2} \quad 3.15$$

$$K_x = 1 + 0,67R^{0,85}f_{LR} \quad 3.16$$

$$f_{LR} = 0,1143X^2 - 1,372X + 4,087 \text{ para } (X \leq 5,5) \quad 3.17$$

$$f_{LR} = 0 \text{ para } (X > 5,5) \quad 3.18$$

$$K_x = 1 - 0,41Rf_{RL} \quad 3.19$$

$$f_{RL} = 0,0192X^2 - 0,550X + 2,477 \text{ para } (X \leq 5,6) \quad 3.20$$

$$f_{RL} = 0 \text{ para } (X > 5,6) \quad 3.21$$

$$X = \log_{10} x \quad 3.22$$

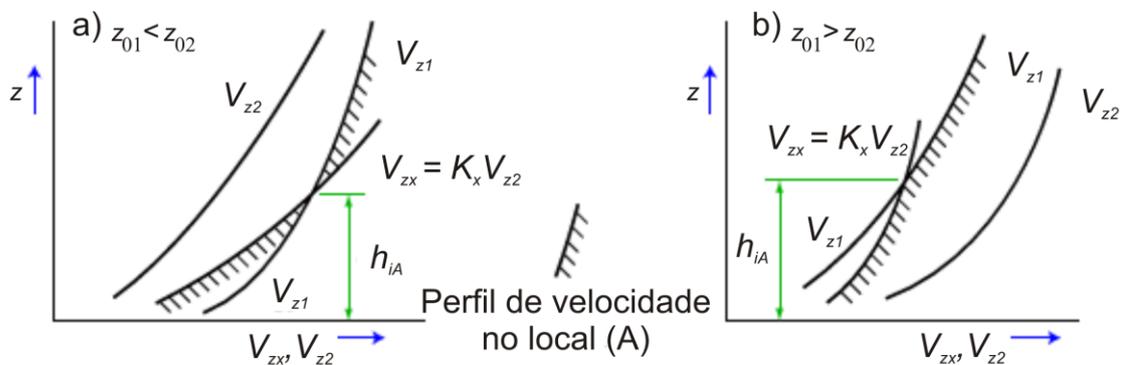


Figura 3.16 – a) Transição de liso para rugoso, b) Transição de rugoso para liso da ESDU 82026 (ESDU, 2002).

Outras abordagens para avaliar a rugosidade de terrenos a barlavento e os correspondentes fatores de correção da exposição incluem Hydra TL (Verkaik, 2001[b]) e o modelo de rajadas (ou *gustiness model* em inglês) de Masters et al. (2010). O modelo Hydra TL (*two-layer* – dupla camada) foi um dos três métodos implementados por Gatey (2011) em um estudo de ventos sinóticos extremos na Europa. Dados do sistema geográfico de informação (*geographic information system* – GIS) do uso da terra foram utilizados com resolução de pixel de 100 m x 100 m, com 44 classes diferentes. Cada classe foi atribuída a uma das 13 diferentes categorias de terreno com comprimentos de rugosidade específicos. O terreno foi analisado ao longo de uma distância de incidência total de 55 km para 12 setores de 30°, com

bandas discretizadas variando entre 0,2 km próximo ao local e 2,5 km a maiores distâncias. O modelo Hydra TL utiliza essas células discretizadas para determinar uma caracterização local e de mesoescala. Essa abordagem foi inicialmente considerada para o presente estudo, mas rejeitada devido à baixa resolução dos dados GIS de uso da terra no Brasil. A resolução de pixel da Cobertura e uso da terra (IBGE, 2014) é de 250 m x 250 m e apenas 13 categorias de uso da terra são definidas – sem diferenciação entre áreas urbanas e suburbanas de alta e baixa densidade. A simplicidade do mapa GIS de uso da terra é demonstrada na Figura 3.17 quando comparada com uma imagem de satélite de Porto Alegre, RS, com a localização de três EMS apresentadas.

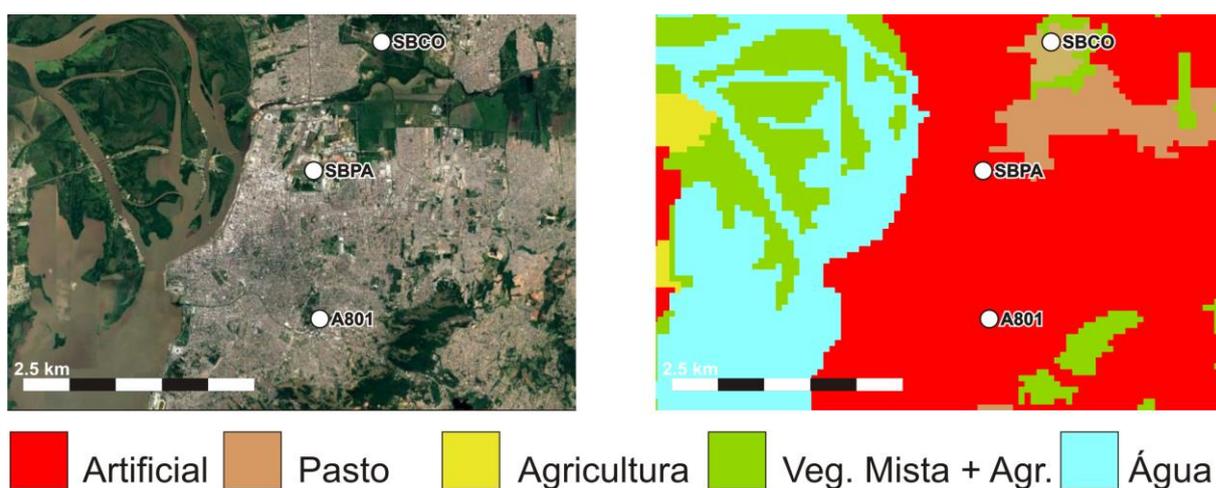


Figura 3.17 – Imagem de satélite de Porto Alegre, RS (esquerda) e mapa GIS do uso da terra (IBGE, 2014).

Todos os métodos previamente mencionados necessitam da exata localização do anemômetro para determinar sua exposição como uma função da direção do vento. Tal informação pode ser difícil de se obter – particularmente considerando que a localização do anemômetro não é constante ao longo do tempo. O modelo de rajada de Masters et al. (2010) não necessita da localização conhecida, mas deriva fatores de rajada, G_V , de dados observados por ângulo do vento ou setor do vento, para então calcular z_0 utilizando relações bem conhecidas. O método foi implementado em 148 EMS-A dos Estados Unidos usando dados registrados com alta resolução temporal de intervalos de 1 minuto. Métodos de redução de dados foram implementados para permitir apenas rajadas sinoticamente geradas no conjunto de G_V analisados, o que significa que a maioria dos eventos com tempestades de raios foi provavelmente removida. Esse método foi inicialmente considerado para implementação neste estudo, mas rejeitado por quatro razões principais:

1. Ausência de dados de alta resolução em ambas EMS de aeródromos e EMS-A do INMET,
2. Falta de correlação entre *DIR* e *G* em EMS-A do INMET,
3. Dominância de eventos não-sinóticos e ausência de eventos sinóticos extremos na maioria das EMS brasileiras, como determinado em estudos preliminares (Vallis et al. 2017; Vallis et al., 2018),
4. Filtragem de rajadas observadas em EMS de aeródromos pela regra $G \geq V + 10$ kt definida pela OACI (2007). Isso é demonstrado na Figura 3.18 para SBPA – Porto Alegre, RS, que não mostra observações abaixo da linha definida por $G = V + 10$.

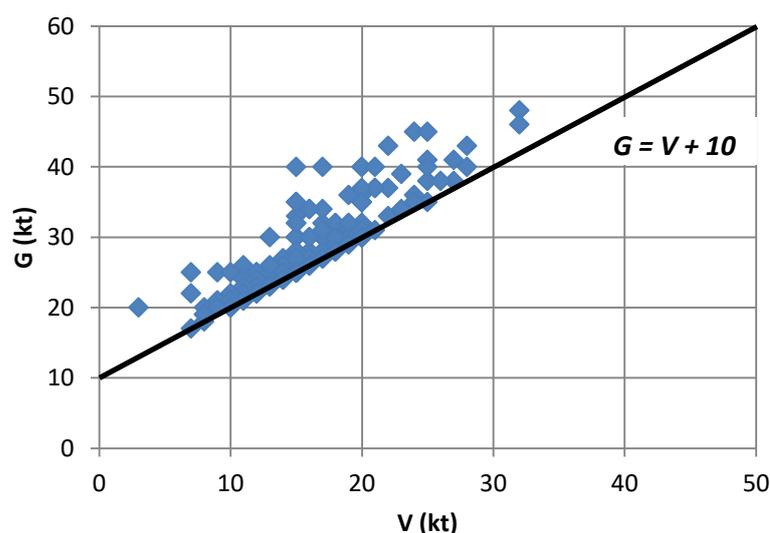


Figura 3.18 – Rajadas observadas e velocidades médias de 10 minutos para ângulos de vento $DIR = 220^{\circ}$ - 240° em SBPA – Porto Alegre, RS, entre 06/1996 e 12/2017.

Todas as técnicas supracitadas consideram apenas modelos de ventos sinóticos com relações bem conhecidas entre comprimentos de rugosidade, perfis verticais de velocidade do vento e de intensidade de turbulência e espectros de turbulência. Modelos para tipos de ventos não-sinóticos não são bem definidos e existe pouca orientação a respeito da homogeneização de velocidades de ventos não-sinóticos.

A ESDU 87034 (ESDU, 1990[a]) oferece um procedimento para considerar diferenças no terreno entre a velocidade do vento de uma tempestade elétrica de referência e a velocidade do vento em um local com terreno diferente. É proposto que, para ventos de tempestades elétricas, um modelo de vento sinótico típico para velocidade de vento média, como o modelo de lei logarítmica, é aplicável até $z = 100$ m, com a velocidade do vento permanecendo

constante acima de $z = 100$ m. Assume-se que a camada limite não está em equilíbrio com as condições de terreno do local com rugosidade z_{02} da Figura 3.16 e, utilizando o método da ESDU 82026 (ESDU, 2002), uma distância arbitrária de $x = 5$ km é usada para desenvolver um perfil aproximado. Um fator, K_s (tempestade elétrica), é determinado para uma combinação de z_0 de referência e z_0 do local, que é então aplicado à velocidade de vento de referência a $z = 10$ m, por exemplo, V_0 , para derivar uma velocidade básica a $z = 10$ m para o local. É possível reverter esse procedimento para corrigir ventos não-sinóticos observados para um comprimento de rugosidade desejado.

Algumas investigações sobre tempestades de raios e ventos não-sinóticos extremos não abrangem a questão da homogeneização (Choi e Hidayat, 2002; Ferreira, 2017; Mohr et al., 2017). Homes (2002) especificamente não aplicou correções de exposição para eventos de *downburst*; por outro lado, Homes et al. (2018) analisaram terrenos dentro de um raio de 500 m de locais com anemômetros conhecidos para determinar fatores de correção baseados em perfis verticais de velocidades horizontais do vento definidos na AS/NZS 1170.2 (2011). Os mesmos fatores de correção de exposição foram aplicados para ambos eventos sinóticos e não-sinóticos, embora fatores de correção total sejam diferentes devido a suposição de $I = 0,1$ para eventos não-sinóticos.

A altura do anemômetro acima do solo também é de crítica preocupação. Embora os protocolos da OMM exijam que o anemômetro esteja a $z = 10$ m acima do terreno, é comum encontrar estações, particularmente no passado, que não cumpriam essa exigência. Alguns anemômetros de concha Belfort estavam a uma altura de $z = 6$ m nos Estados Unidos (Lombardo, 2012), o principal anemômetro do aeroporto de Wellington, Nova Zelândia, mudou de $z = 11$ m para $z = 7$ m em 1993 (Pirooz et al. 2018) e o anemômetro que registrava os dados responsáveis pela confecção do mapa uruguaio de velocidade básica do vento (UNIT, 1984) estava localizado 45 m acima do solo e 13 m acima do telhado de uma edificação de 4 andares (Durañona, 2014). Como Durañona (2014) reparou, dados adquiridos de tal localidade são severamente afetados pela aceleração sobre o telhado, sendo praticamente impossível de homogeneizar para uma altura de $z = 10$ m acima do solo. A norma do vento canadense, NBCC 2010 (NRCC, 2010) revisou as velocidades básicas de vento para excluir dados que foram registrados a partir de anemômetros instalados em faróis, hangares de aeroportos e outras estruturas. Isso resultou em um decréscimo das velocidades do vento em diversos locais.

3.2.3 METADADOS NOS LOCAIS DE ESTUDO

Poucas regiões disponibilizam metadados de estações ao público de modo a contribuir em pesquisa e, na maioria das vezes, a busca intensa dessas informações é deixada aos grupos de pesquisa. Verkaik (2001[a]) publicou as localizações de anemômetros na Holanda, que Gatey (2011) implementou em um estudo dos ventos sinóticos europeus. O Instituto Nacional de Normas e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology – NIST*) realizou uma investigação sobre as localizações exatas de anemômetros nos aeródromos dos Estados Unidos e disponibilizou imagens de satélite através de seu *website*⁶. A NOAA desenvolveu um produto online baseado no Repositório de Observações Históricas de Metadados (*Historical Observing Metadata Repository – HOMR*), que lista metadados históricos para EMS nos Estados Unidos⁷. São dados tipo de anemômetro e coordenadas, com fotos a cada 45° para auxiliar na determinação do terreno em algumas estações. A Agência de Meteorologia (*Bureau of Meteorology – BoM*) da Austrália publica atualizações anuais dos metadados das estações através de seu *website*, mas a localização exata de muitos anemômetros não é incluída, particularmente para aeródromos maiores com múltiplos anemômetros. O *link* a seguir é um exemplo dos metadados disponíveis em YBAS – Alice Springs, NT⁸.

De 2016 a 2018, esforços foram feitos por voluntários do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), UFRGS, para reunir metadados históricos e atuais de equipamentos anemométricos em EMS alvo. Dispondo de informações como altura, localização, exposição de terreno, marca e modelo do anemômetro, é teoricamente possível homogeneizar dados observados para uma única altura, exposição de terreno e intervalo de média pré-determinados para todas as estações. Um resumo dos momentos históricos chave no desenvolvimento de observações de velocidade do vento em EMS de aeródromos brasileiros e EMS-A do INMET, conforme determinado por este estudo, é mostrado em forma de linha do tempo na Figura 3.19. A linha do tempo é apresentada para quatro categorias: operação de estações, definição de rajada, instrumentação anemométrica e condições de exposição (localização e altura). Questões pertinentes que permanecem sem respostas definitivas também são listadas para cada categoria.

⁶ https://www.itl.nist.gov/div898/winds/NIST_TN/sophie_pictures.htm

⁷ <https://www.ncdc.noaa.gov/homr/>

⁸ http://www.bom.gov.au/clim_data/cdio/metadata/pdf/siteinfo/IDCJMD0040.015590.SiteInfo.pdf

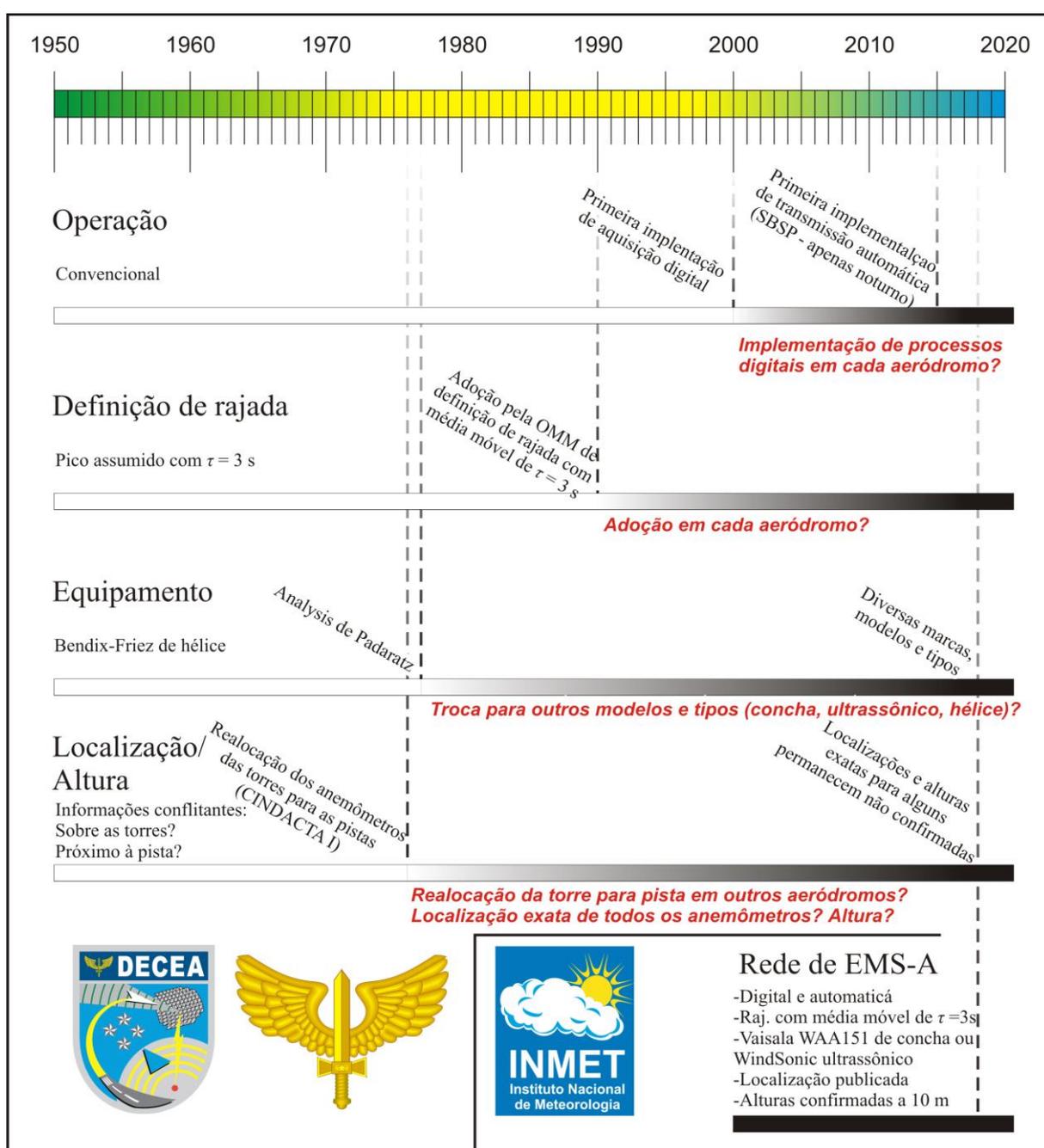


Figura 3.19 – Momentos chave com relação a observações de vento em estações meteorológicas de superfície brasileiras.

3.2.3.1 EMS dos aeródromos

Ao compilar medições de rajada pico e velocidade do vento em 49 aeródromos brasileiros entre 1950 e 1974, Vieira Filho (1975) citou o protocolo da FAB (Ministério da Aeronáutica, 1964), que definiu o intervalo de média de uma rajada pico como 3 segundos devido à “sensibilidade aproximada dos anemômetros” e, como tal, a duração de 3 segundos foi adotada para V_0 na NBR 6123 (ABNT, 1988). Vieira Filho (1975), Padaratz (1977) e Hirata et

al. (2010) todos declararam que os anemômetros de hélice Bendix-Friez eram comumente utilizados em aeroportos brasileiros durante esse período. A constante de distância do modelo 120 do Bendix-Friez de 3 pás é $d = 4,6$ m, com $d = 5,8$ m para a versão de 6 pás (Moses et al., 1968). Não existe registro conhecido de uma investigação da resposta de rajada efetiva para esse sistema de registro, mas dados estudos similares de Holmes e Ginger (2012) e Kwon e Kareem (2014), é improvável que o tempo efetivo do intervalo de média seja $\tau = 3$ s.



Figura 3.20 – O anemômetro de hélice Bendix-Friez (Gill, 1973).

De modo a compilar metadados de todos os aeródromos relevantes, autoridades relevantes foram contatadas, seja por telefone ou e-mail, incluindo todos os aeródromos brasileiros de interesse, DECEA, ICEA, órgãos regionais do CINDACTA (Centro Integrado de Defesa Aérea e Tráfego Aéreo), órgãos regionais da INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), INUMET (Uruguai), SMN (Argentina), Météo – França (Guiana Francesa) e Met Office (Reino Unido – Ilhas Malvinas). A Publicação de Informação Aeronáutica (DECEA, 2018) também foi consultada, porém pode conter detalhes desatualizados para muitos aeródromos.

Vieira Filho (1975) declarou que anemômetros em aeródromos brasileiros estavam ou a uma altura de $z = 10$ m acima do solo, ou a uma altura tal que, quando considerando os obstáculos próximos, resultaria no efeito de estarem a $z = 10$ m, e todas as estações foram consideradas como estando em terreno plano e aberto. Nenhuma informação específica é dada a respeito da profundidade da investigação de Vieira Filho (1975) e, desse modo, é mais provável que essas declarações sejam convenientes suposições do que o resultado de qualquer investigação. Por

meio de entrevistas conduzidas para o presente estudo com aqueles que trabalharam na instalação dos equipamentos meteorológicos, foi estabelecido que os anemômetros de aeródromos do CINDACTA I não estavam instalados adjacentes às pistas de pouso até 1976 e que, antes disso, os equipamentos estavam localizados sobre torres de controle. Tais aeródromos incluem SBSP – Congonhas, SP, SBKP – Campinas, SP, SBSJ – São José dos Campos, SP, SBBR – Brasília, DF, SBAN – Anápolis, GO, SBBH – Pampulha, MG, SBSC – Santa Cruz, RJ e SBYS – Pirassununga, SP. O mesmo foi feito no ano seguinte para SBGL – Galeão, RJ e SBEG – Manaus, AM. Tal informação traz sérias dúvidas quanto à validade do estudo conduzido por Padaratz (1977) para derivar o mapa V_0 do Brasil.

Somado ao testemunho de profissionais de instrumentação meteorológica, diversos documentos indicam que anemômetros continuaram estando localizados sobre edificações por muitos anos. Quatro exemplos disso são mostrados na Figura 3.21. Desenhos esquemáticos da pista de pouso, desenhados em 12/2003 e fornecidos pelo CINDACTA II, indicam que o anemômetro principal em SBCY – Cuiabá, MT, estava localizado sobre a torre de controle naquela época. Coordenadas de latitude e longitude de 07/2009 também foram dadas pelo CINDACTA II para a localização do anemômetro principal do SBMT – Campo de Marte, SP, que mostram sua instalação sobre um hangar próximo à pista. Uma foto tirada em SBAU – Araçatuba, SP, carregada no hoje extinto *website* panoramio.com pelo usuário Leo Benez em 06/12/2007, mostra a localização de um anemômetro no topo da torre de controle do aeródromo. Informações para SBKP – Campinas, SP, fornecida pela AIP (DECEA, 2018), suspeitas de estarem desatualizadas atualmente, descrevem a localização do anemômetro principal como 1,47 km do ponto de aterrissagem 15 ao longo da pista, e 794 m de seu eixo. Uma simples consulta utilizando imagens do Google Earth mostra que essa localização está entre edificações. Além disso, os operadores do aeródromo de SBBU – Bauru, SP, confirmaram que, até 2002, dois anemômetros estavam instalados no topo da torre de controle – 18 m acima do nível do solo.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.21 – Instalações anteriores de anemômetros sobre edificações a) SBCY – Cuiabá, MT, b) SBAU – Araçatuba, SP, c) SBMT – Campo de Marte, SP d) SBKP – Campinas, SP.

O metadado mais difícil de se obter das EMS de aeródromos brasileiros foi o tipo de anemômetro, seguido pela altura, com localização sendo o mais fácil de se obter.

Pouquíssimos aeródromos conseguiram prover qualquer informação histórica e estavam basicamente restritos apenas a metadados atuais. Informações do tipo de anemômetro foram retiradas da AIP (DECEA, 2018) para 75 aeródromos, com apenas 4 fornecendo informação e INFRAERO-BELÉM provendo informação para 2 aeródromos. Anemômetros tipo concha contabilizaram 58 aeródromos, os tipo hélice 14 e ultrassônicos em 9 aeródromos. Suspeita-se que as informações da AIP estejam desatualizadas para muitos aeródromos, o que quer dizer que tais contagens podem não ser uma representação real. Pouquíssimas marcas e modelos foram confirmados, mas aqueles que foram incluem Vaisala WS425 Ultrassônico, Vaisala WMT703A Ultrassônico, Vaisala WAA 151 de Concha, $d = 2,0$ m (Vaisala, 2002) e Impulspphysic 43121/43303 (desconhecido).

Conforme apresentado na Figura 3.22, a grande maioria das alturas de anemômetro não foi confirmada. Das que foram, $z = 10$ m foi a mais comum. Aeródromos brasileiros que confirmaram alturas de anemômetro baixas incluem $z = 6,8$ m em SBIH – Itaituba, PA, $z = 6$ m em SBBU – Bauru, SP, e $z = 5,5$ m em SBPP – Ponta Porã, MS.

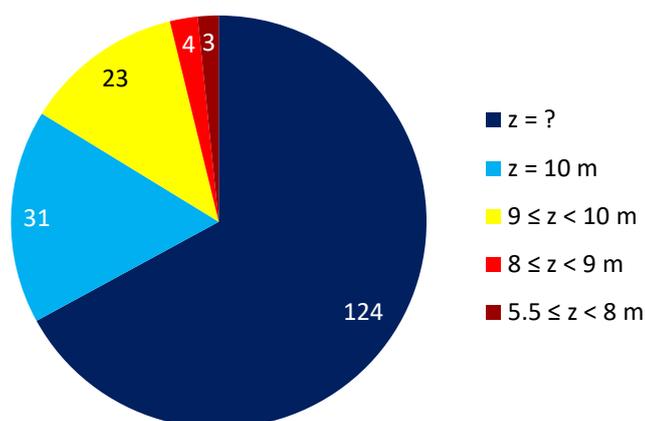


Figura 3.22 – Alturas de anemômetros em aeródromos brasileiros durante 2016-2018.

As localizações dos anemômetros foram fornecidas por autoridades relevantes, tiradas da AIP (DECEA, 2018) ou estimadas utilizando conhecimento da localização da direção da pista e um estudo de imagens de satélite. Uma análise similar à de Holmes et al. (2018) foi realizada em 8 setores de 45° ao longo de uma distância de incidência de 500 m para todas localizações de anemômetros atuais. A categoria média do terreno de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988), com a inclusão de categorias intermediárias, foi determinada para cada setor, com CAT II sendo a mais comum, como apresentado na Figura 3.23. Entretanto, houveram vários casos de CAT III-IV, como o exemplo de SMFI – Foz do Iguaçu, PR, mostrado na Figura

3.24. Vegetação alta e densa a oeste e sudoeste foram determinadas como CAT IV, enquanto áreas abertas a leste e sudeste correspondem a CAT II. Os demais setores foram julgados como sendo CAT III e III ½. De acordo com o Google Earth, a imagem de satélite da Figura 3.24 foi tirada em 09/09/2018. Uma imagem de satélite correspondente ao mesmo local em 29/01/2019 é dada na Figura 3.25, que mostra que a vegetação imediatamente adjacente a oeste e noroeste do anemômetro foi arrasada, salientando a natureza variável do terreno no entorno de anemômetros e o perigo da suposição de uma vizinhança constante ou estática.

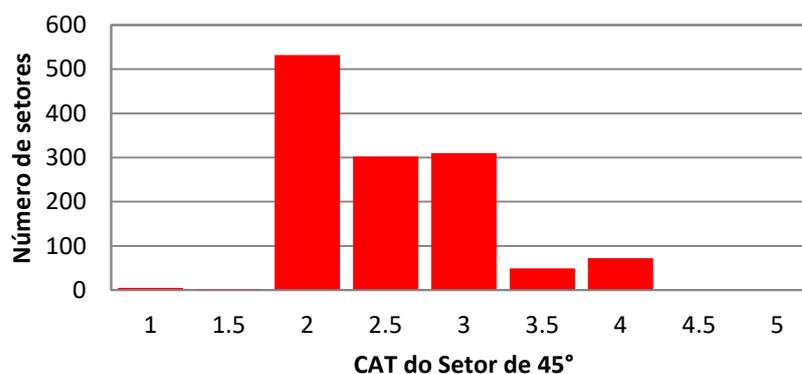


Figura 3.23 – Histograma das categorias médias de terreno a barlavento para anemômetros em EMS de aeródromos brasileiros.

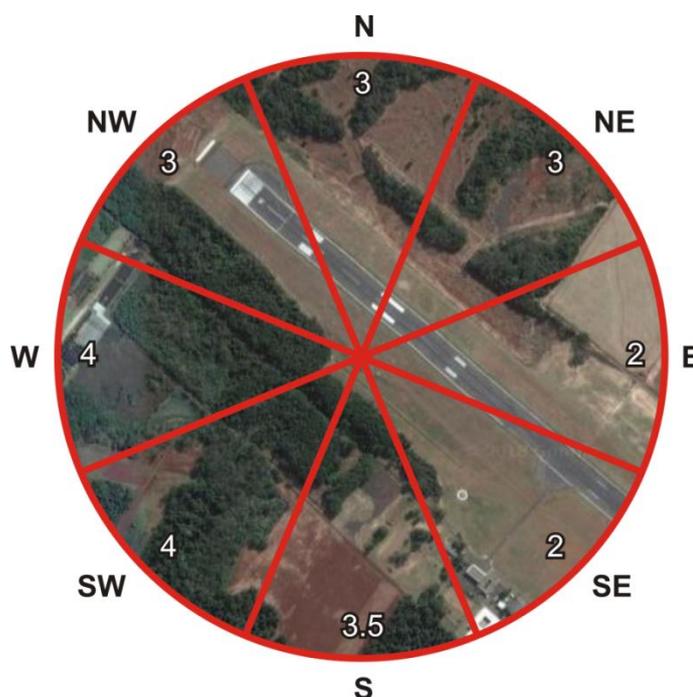


Figura 3.24 – Avaliação da categoria de terreno média por setor de 45° ao longo de 500 m centralizada na localização do anemômetro principal de SBFI – Foz do Iguaçu, PR (datada de 09/09/2018).



Figura 3.25 – Imagem de satélite de SBFi – Foz do Iguaçu, PR, mostrando o arrasamento da vegetação imediatamente adjacente à pista (datada de 29/01/2019).

3.2.1.2 EMS-A do INMET

Além das coordenadas de latitude e longitude de todas as EMS-A disponíveis através do *website*⁹ do INMET, informações sobre altura, tipo/modelo de anemômetro e alterações de qualquer metadado foram requisitadas da sede do INMET em Brasília e de todos os DISMEs. Com exceção de um DISME, todos grupos responderam com informações apropriadas, incluindo a confirmação que todos anemômetros estavam instalados a uma altura de $z = 10$ m.

Informações recebidas do INMET confirmaram que apenas dois tipos de anemômetros são utilizados em EMS-A: Vaisala WAA151 de concha ou Gill WindSonic ultrassônico. Apesar de haverem pequenas discrepâncias entre as informações recebidas dos DISMEs e INMET em Brasília, tais como o 7º DISME confirmando o uso de anemômetros ultrassônicos Vaisala WAS 425 em duas estações e a afirmação de que o Gill WindSonic ultrassônico sempre foi utilizado em A001 – Brasília, DF, desde a comissão da estação em 07/05/2000, apesar do anemômetro não ter sido lançado no mercado até 12/2001 (Sims, 2019), os metadados são melhor organizados pelo INMET do que pelas redes de aeródromos. Uma contagem revelou que o Vaisala WAA151 era o mais comum, com 340 instalações em 2018, contra 161 do Gill WindSonic. Havia 24 EMS-A que mudaram do Vaisala WAA151 para o Gill WindSonic em algum momento durante a operação, e 2 EMS-A que mudaram do Gill WindSonic para o Vaisala WAA151. O Vaisala WAA151 é um anemômetro de pequenas conchas responsivo e seu tamanho pode ser comparado com o do Synchronac 706, um tipo concha muito mais

⁹ <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

pesado, na Figura 3.26. O Gill WindSonic, mostrado na Figura 3.27, utiliza quatro sensores e tem uma cobertura para prevenir a interferência de pássaros e precipitação.



Figura 3.26 – Anemômetro concha Vaisala WAA151 (esquerda), anemômetro concha Synchronac 706 (meio), e anemômetro ultrassônico RM Young Model 8100 3D (Gorman, 2004).



Figura 3.27 – Anemômetro ultrassônico Gill WindSonic.

Apesar de serem consideradas localizações permanentemente fixas, os registros indicam que pelo menos 9 EMS-A mudaram sua localização durante sua vida operacional. As coordenadas fornecidas das localizações anteriores foram aproximações e as localizações exatas são desconhecidas. Uma análise do terreno dentro de 500 m dos anemômetros também foi realizada, com as contagens de terrenos apresentadas na Figura 3.28. De um modo geral, as condições de exposição para as EMS-A do INMET são muito mais afetadas por construções e vegetação do que as EMS de aeródromos, com CAT II sendo a categoria de terreno mais frequentemente encontrada. As exposições das EMS-A do INMET variam entre aquelas localizadas em locais costeiros, centros urbanos, picos de montanhas, aeroportos e campos abertos. Um exemplo de duas condições de exposição contrastantes é apresentado na Figura

3.29 – com vegetação alta e edificações cercando todos os 360° da A801 – Porto Alegre, RS; enquanto exposição ótima com campo aberto é experimentada pela A532 – Diamantina, MG, para todos os ângulos.

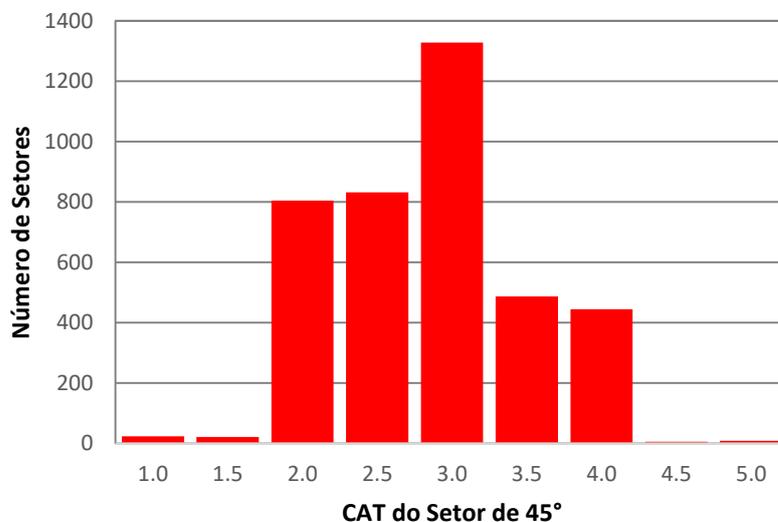


Figura 3.28 – Histograma das categorias médias do terreno a barlavento para anemômetros em EMS-A do INMET.

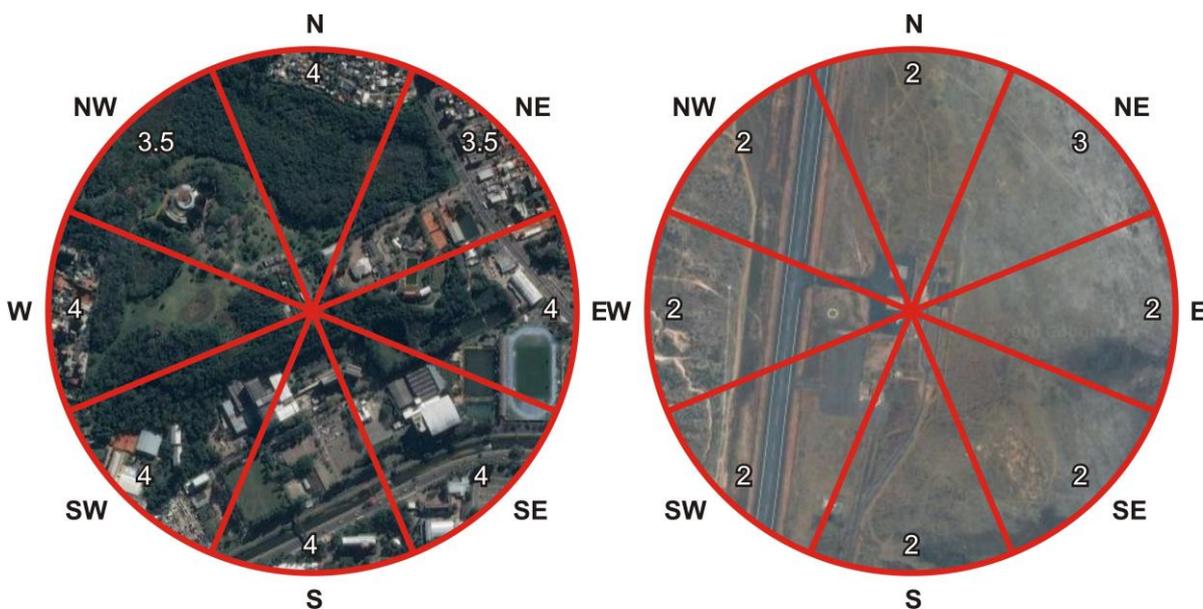


Figura 3.29 – Avaliação da categoria de terreno média por setor de 45° ao longo de 500 m centralizada na localização do anemômetro em A801 – Porto Alegre, RS (esquerda), e A532 – Diamantina, MG (direita).