

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (UFMA)
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIEL JOSÉ SILVA CARVALHO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE PERFILADORES REMOTOS EM EVENTOS DE CHUVA

Trabalho de Conclusão de Curso

São Luís
2026

ADRIEL JOSÉ SILVA CARVALHO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE PERFILADORES REMOTOS EM EVENTOS DE CHUVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Denisson Queiroz Oliveira
Coorientador: Francisco Leite de Albuquerque Neto

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Carvalho, Adriel José Silva.

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE PERFILADORES REMOTOS EM
EVENTOS DE CHUVA / Adriel José Silva Carvalho. - 2026.

56 p.

Corientador(a) 1: Francisco Leite de Albuquerque Neto.

Orientador(a): Denisson Queiroz Oliveira.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2026.

1. Perfilador de Vento. 2. Sodar. 3. Lidar. 4.
Precipitação. I. Neto, Francisco Leite de Albuquerque.
II. Oliveira, Denisson Queiroz. III. Título.

Dedico este trabalho a Nossa Senhora, Santa Mãe de Deus, presença constante que me ampara e me guia, estendendo-me a mão mesmo quando minhas próprias forças e méritos me faltam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todas as graças alcançadas e pela força concedida para superar cada desafio desta jornada.

Aos meus pais, Ribamar e Waldenice, e à minha irmã Ariela, pelo amor incondicional e por serem meu porto seguro, apoiando-me em cada decisão e escolha correta que fiz até aqui.

À minha irmã Adriele, cujas orientações e dicas sobre o curso foram fundamentais para que eu trilhasse um caminho mais assertivo e sereno nesta caminhada acadêmica.

À minha namorada, Carla, que antes mesmo de ser minha companheira de vida, já era minha parceira de estudos e presença constante em diversas disciplinas. Obrigado pelo apoio e pela paciência.

Ao meu orientador, Denisson, pela imensa paciência e pela confiança depositada em mim. Suas orientações foram cruciais para o desenvolvimento das minhas habilidades como pesquisador.

Ao meu coorientador, Albuquerque, pela disponibilidade e pelas inúmeras reuniões dedicadas a alinhar ideias e atividades que permitiram a evolução constante desta pesquisa.

A todos os professores do curso, que com dedicação mantêm o ensino de pé e compartilham com excelência o conhecimento acumulado ao longo de anos de experiência.

Aos meus “UFamigos”. Vocês foram a minha válvula de escape nos momentos de estresse e a alegria necessária no baralho de lei após o almoço.

Aos amigos que fiz pelo caminho: sem a amizade e o apoio de vocês, eu não teria chegado até aqui.

“É por Maria que a salvação do mundo começou,
e é por Maria que deve ser consumada.”

São Luís Maria Grignion de Montfort

RESUMO

Neste trabalho é analisado quantitativamente o desempenho dos perfiladores de vento SODAR e LIDAR durante eventos de precipitação, com foco em sua disponibilidade de alcance (DA) e na representatividade das medições de vento. O perfil de vento e dados meteorológicos de suporte foram coletados na região de Barreirinhas e Paulino Neves, Maranhão, Brasil, em diversas localidades, tanto próximas quanto distantes do litoral. Os resultados mostram que a precipitação afeta a DA do SODAR, que, embora tenha uma rápida recuperação após a chuva, apresenta quedas significativas em eventos mais consistentes. Por outro lado, o LIDAR próximo ao litoral teve pouca influência da precipitação na sua DA, enquanto o LIDAR distante do litoral apresentou maior variabilidade, com quedas de DA não necessariamente ligadas aos eventos de precipitação. A partir dos resultados obtidos neste estudo, observa-se que a localização e as condições meteorológicas específicas influenciam significativamente o desempenho desses equipamentos, devendo ser consideradas na escolha da tecnologia para estimativas do perfil vertical de vento.

Palavras-chave: Perfilador de vento. SODAR. LIDAR. Precipitação.

ABSTRACT

This study quantitatively analyzes the performance of SODAR and LIDAR wind profilers during precipitation events, focusing on their Range Availability (RA) and the representativeness of wind measurements. Wind profiles and supporting meteorological data were collected in the regions of Barreirinhas and Paulino Neves, Maranhão, Brazil, at various locations both near and far from the coast. The results show that precipitation affects the SODAR's RA, which, despite recovering quickly after rain, shows significant drops during more consistent events. Conversely, the LIDAR located near the coast showed little influence from precipitation on its RA, while the LIDAR further inland presented greater variability, with RA drops not necessarily linked to precipitation events. Based on the results obtained in this study, it is observed that the location and specific meteorological conditions significantly influence the performance of these devices, and should be considered when choosing the technology for vertical wind profile estimates.

Keywords: Wind profiler. SODAR. LIDAR. Precipitation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Velocidade do Vento - Dia: 29/05/2022	18
Figura 2.2 – Perfil vertical da velocidade do vento	19
Figura 3.1 – Representação geográfica dos pontos P0 ao P7 no mapa	26
Figura 4.1 – Alcance do SODAR sob eventos de precipitação	30
Figura 4.2 – DA média em relação à CON10 e ao AC10	31
Figura 4.3 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 30 m sem precipitação	34
Figura 4.4 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 30 m com precipitação	35
Figura 4.5 – Alcance do LIDAR próximo do litoral durante eventos de precipitação . .	36
Figura 4.6 – DA média em relação à CON10 e ao AC10	37
Figura 4.7 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m sem precipitação	38
Figura 4.8 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m com precipitação	39
Figura 4.9 – Quantidade de ocorrências de eventos com quedas de DA posterior à precipitação	41
Figura 4.10 – DA média em relação à CON10 ao AC10	43
Figura 4.11 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m sem precipitação	44
Figura 4.12 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m com precipitação	45
Figura 4.13 – Alcance do LIDAR distante do litoral durante eventos de precipitação . .	46
Figura 4.14 – Curva de temperatura diária modelo	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de referência para o comprimento de rugosidade aerodinâmica conforme a natureza do terreno	20
Tabela 2.2 – Características técnicas do SODAR e LIDAR	22
Tabela 3.1 – Pontos geográficos e intervalos de operação do LIDAR	26
Tabela 4.1 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10	32
Tabela 4.2 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10	32
Tabela 4.3 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em função de AC10 e CON10 (10 min)	32
Tabela 4.4 – Distribuição da DA do equipamento em diferentes valores de CON10. A maior porcentagem para cada valor de CON10 está destacado em negrito	33
Tabela 4.5 – Quantidade de eventos observados para cada situação	34
Tabela 4.6 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10	37
Tabela 4.7 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10	37
Tabela 4.8 – Quantidade de eventos observados para cada situação	38
Tabela 4.9 – Quantidade de eventos que houve queda de DA após precipitação . . .	39
Tabela 4.10 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação a CONE	40
Tabela 4.11 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação a duração total .	40
Tabela 4.12 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação ao ACE médio . .	41
Tabela 4.13 – Correlação entre os parâmetros de evento de precipitação com os de queda de DA	42
Tabela 4.14 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10	43
Tabela 4.15 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10	43
Tabela 4.16 – Quantidade de observações coletados para cada situação	44
Tabela 4.17 – DA média nos dias em que houve precipitação, não houve precipitação e para os dias em que não houve precipitação e houve queda de DA . . .	45
Tabela 4.18 – DA média para cada quadrante de direção do vento	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC10	Acumulado de chuva no intervalo de 10 minutos (mm).
ACE	Acumulado do Evento
Amax	Alcance máximo
CBL	Convective Boundary Layer
CL	Camada Limite
CLA	Camada Limite Atmosférica
CON10	Índice de consistência (quantidade de leituras válidas no intervalo de 10 min).
CONE	Consistência do Evento
DA	Disponibilidade de alturas
GWEC	Global Wind Energy Council
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLJ	Low Level Jets
MME	Ministério de Minas e Energia
RS	Remote Sensing
SBL	Stable Boundary Layer
SBL	Stable Boundary Layers
SNR	Signal-to-noise ratio
SODAR	Sound Detection and Ranging

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estado da arte	13
1.2	Objetivo	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivo específico	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	A camada limite atmosférica	17
2.1.1	Estrutura Vertical e ciclo diário da CLA	17
2.1.2	Fundamentação Matemática do Perfil Vertical do Vento	19
2.1.3	Evolução Tecnológica: Do Anemômetro Mecânico ao Sensoriamento Remoto	21
2.2	PRINCÍPIOS DE SENSOREAMENTO REMOTO ATIVO NA ATMOSFERA	21
2.2.1	A Natureza do Alvo Atmosférico: Aerossóis e Inhomogeneidades	22
2.2.2	Fundamentação Física do Efeito Doppler	23
2.2.3	A Relação Sinal-Ruído como Métrica de Desempenho	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Aquisição de dados	25
3.2	Localização e intervalo de medição dos sensores.	25
3.3	Critérios de análise de dados	26
3.3.1	Disponibilidade de alturas (DA)	26
3.3.2	Alcance máximo (Amax)	27
3.3.3	Eventos de precipitação	27
3.3.4	Eventos de precipitação contínuos	27
3.3.5	Queda de DA acumulado	28
3.3.6	Correlação entre o vento na altura mais baixa do perfilador e o vento observado pelo anemômetro a 10 m	28
3.4	Etapas da análise	29
4	RESULTADOS	30
4.1	SODAR	30
4.2	LIDAR	35
4.2.1	LIDAR próximo do litoral	35
4.2.2	LIDAR distante do litoral	42
4.3	Análise da direção horizontal do vento	46

4.4	Análise de Nebulosidade	48
4.5	Síntese dos Resultados	49
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Contribuições e produção científica	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Na última década, houve um crescimento significativo da geração eólica em todo o mundo. Esse crescimento está alinhado com a tendência global de aumento da participação de fontes limpas na matriz elétrica, um dos pilares do desenvolvimento sustentável apoiado em soluções de baixo carbono. A fonte eólica tem aumentado sua participação de forma consistente, ultrapassando o marco de 1TW de potência instalada em todo o mundo no ano de 2023 (GWEC, 2024).

O grande número de empreendimentos outorgados e o aumento da altura de captação da energia devido ao incremento no tamanho dos aerogeradores, bem como a necessidade de otimização de custos de geração, levaram a investigações para melhor entender e prever os fenômenos que impactam na geração de energia eólica. Embora os países contem com legislações diferentes, em todos os casos é necessário um período de medições ininterruptas da velocidade e direção do vento em determinado sítio para homologação dos projetos junto a governos e agências reguladoras. No Brasil, por exemplo, a Portaria MME nº 102/2016 estabelece critérios para o cadastramento de projetos de geração eólica, incluindo exigências de medições contínuas da velocidade e direção do vento por períodos mínimos de 36 meses consecutivos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016). Isto torna vital o desenvolvimento de métodos e tecnologias capazes de estimar adequadamente os recursos eólicos de forma confiável em alturas difíceis de serem atingidas por torres anemométricas.

Os perfiladores verticais de vento, como o SODAR e o LIDAR, são instrumentos que funcionam baseados no efeito Doppler e são capazes de realizar estimativas de velocidade e direção do vento de forma confiável em intervalos de alturas diferentes, previamente configuradas pelo usuário, e com alcance maior do que os instrumentos convencionais. Estes sensores apresentam variação de seus desempenhos principalmente frente às condições de variação de temperatura na atmosfera e ruídos, no caso do SODAR, e quantidade de aerossóis, no caso do LIDAR.

Eles são soluções versáteis, confiáveis, robustas e reutilizáveis, diminuindo os custos de campanhas de medição e permitindo uma caracterização mais acurada do recurso eólico disponível em determinado local. Ao contrário das medições convencionais usando torres anemométricas, os perfiladores não necessitam de aproximações ou extrapolações para determinar a velocidade em maiores alturas. Esta característica os torna mais atraentes para uso em campanhas de medições, pois as alturas observadas são condizentes com a tendência de elevação da altura de *hub* das turbinas eólicas. Esse aumento do *hub* permite a exploração de recursos eólicos em alturas mais elevadas, mas também demanda instrumentos igualmente capazes de observar as variáveis nessas alturas.

1.1 Estado da arte

Com o desenvolvimento dos perfiladores remotos, diversas investigações anteriores já realizaram comparações de curto e longo prazo entre medidores convencionais (anemômetros mecânicos e sônicos) e perfiladores remotos. Os resultados publicados já demonstraram que as medições possuem boa correlação, embora com algumas peculiaridades ligadas ao funcionamento dos instrumentos convencionais em comparação aos perfiladores remotos, validando o uso dos perfiladores no sensoriamento remoto de vento para fins de geração de energia elétrica e outras finalidades ligadas à aviação.

Frehlich et al. (2008) investigaram a camada limite estável em áreas suburbanas, concentrando-se na turbulência de pequena escala, comparando o *Tethered Lifting System* (TLS) e um LIDAR Doppler, e desenvolvendo um algoritmo de processamento para avaliar as estatísticas de turbulência. Kumer et al. (2014) compararam os dados adquiridos a partir de um LIDAR de varredura, um LIDAR vertical e radiossondas. Os resultados mostraram que as medições se correlacionam melhor à medida que a altura aumenta. Kim et al. (2016) compararam medições de LIDAR baseadas em solo e de torres meteorológicas sob várias condições de terreno, demonstrando boa confiabilidade de medição. Dubov et al. (2017) compararam medições de dados de vento de SODAR e torre meteorológica em diferentes níveis de altura em terreno plano, mostrando boas correlações (0,943) durante o período. Dubov et al. (2018) compararam LIDAR e uma torre meteorológica, mostrando uma boa correlação entre todas as alturas. Outras investigações semelhantes foram realizadas por Chaurasiya et al. (2017) e Khan e Tariq (2018), encontrando altas correlações entre as medições.

Outras comparações entre perfiladores de vento e outras tecnologias estão disponíveis na literatura. Zhou e Bu (2021) compararam medições de um LIDAR com um radar de sondagem de banda L e um anemômetro de copo. He et al. (2022) compararam medições de SODAR com um radiômetro de micro-ondas.

Sinha et al. (2018) investigaram a aplicação de uma função de custo multiparamétrica a medições de SODAR e radar, indicando bom desempenho e complementaridade entre ambos os sistemas de perfilamento de vento. Buzdugan e Stefan (2020) compararam medições de LIDAR e SODAR com observações de aeronaves, enquanto Buzdugan et al. (2021) compararam perfiladores de vento com radares de vigilância.

Finn et al. (2017) compararam o perfil de vento do SODAR com as medições de tomografia baseada em veículos aéreos não tripulados, encontrando níveis semelhantes de correspondência.

Lang e McKeogh (2011) compararam as medições de perfiladores LIDAR e SODAR com medidas de uma torre meteorológica instrumentada com anemômetros de copo em um terreno complexo, típico de parques eólicos (typical semi-complex upland terrain). Os resultados obtidos demonstraram boa correlação entre as medidas dos instrumentos con-

vencionais e perfiladores, mas também indicaram que os perfiladores têm desempenho melhor para estimar ventos em baixas velocidades. Kelley et al. (2007) conduziram comparações entre perfiladores LIDAR e SODAR e anemômetros sônicos instalados em uma torre de 116 m. Os resultados demonstraram boa correlação entre as medidas, principalmente entre o LIDAR e os anemômetros sônicos.

Torres Junior et al. (2022) investigou e comparou o desempenho de perfiladores SODAR e LIDAR operando simultaneamente durante um curto intervalo de tempo em dois pontos: um em zona urbana e outro em um ponto próximo ao litoral. Os resultados encontrados mostram que o desempenho de ambos equipamentos é próximo, apresentando boa correlação nas medições de vento, embora o LIDAR tenha apresentado melhor desempenho próximo ao litoral. Z. Liu et al. (2022) apresentaram uma revisão sobre os avanços da tecnologia de LIDARs e suas diferentes aplicações. H. Gao et al. (2022) apresentaram uma técnica para descrever o 3-D wind field em terrenos complexos de forma mais apropriada usando um único LIDAR em conjunto com séries de Taylor e Ridge-DI method.

Já Wolz et al. (2024) compararam as medições de vento de uma configuração de torre virtual tripla de LIDAR Doppler com aquelas de um anemômetro sônico localizado a 90m de altura em uma torre instrumentada e com aquelas de dois LIDARs Doppler únicos para avaliar o efeito da suposição de homogeneidade horizontal usada para aplicações de LIDAR Doppler único na precisão da medição. Os resultados demonstraram que um único LIDAR fornece medidas confiáveis de intensidade e direção do vento em terrenos heterogêneos, mas basicamente planos, em diferentes configurações de varredura.

Embora a literatura apresente comparações entre medições de perfiladores de vento em experimentos com diferentes durações de tempo e localizado em regiões de diferentes latitudes, os autores não encontraram na literatura qualquer informação a respeito do desempenho destes sensores em condições meteorológicas específicas, como a chuva ou comparações realizadas durante campanhas de medição em regiões com alto índice de pluviosidade. A chuva pode ser considerada um evento importante do ponto de vista do funcionamento dos perfiladores porque ela tem a capacidade de modificar a atmosfera, influenciando no funcionamento dos sensores. No caso do LIDAR, as partículas e aerossóis que refletem o sinal são “lavados” da atmosfera, resultando em uma condição de falta de partículas reflexivas durante um intervalo de tempo. Até que estes aerossóis se recomponham, é esperada uma queda na eficiência do LIDAR. Para o SODAR, por sua vez, a chuva também desfaz as inhomogeneidades atmosféricas ao uniformizar a temperatura em uma ampla faixa de alturas e diminuir os gradientes entre diferentes camadas, também influenciando na reflexão das ondas sonoras. Aliado a isso, ainda existe o ruído da chuva, que pode causar perda de sensibilidade na medição do SODAR.

Investigar e compreender o funcionamento destes perfiladores e as influências de condições de chuva no desempenho deles é importante para a indústria eólica haja vista que a queda no seu rendimento pode impactar na qualidade e/ou na quantidade dos dados

observados, deteriorando os índices de obtenção de dados válidos, impedindo assim a validação dos dados obtidos durante as campanhas de medição por empresas certificadoras para obtenção de outorgas e deteriorando a qualidade da previsão de energia anual gerada, elevando os riscos financeiros do projeto eólico.

A redução dos dados coletados pode impactar na validação das campanhas de medição pelas empresas certificadoras para obtenção de autorizações, além de deteriorar a qualidade da previsão anual de energia gerada, aumentando os riscos financeiros do projeto eólico.

Neste trabalho pretende-se trazer uma contribuição ao analisar o desempenho dos perfiladores remotos SODAR e LIDAR, com intuito de investigar as medições de ambos quando estão inseridos em eventos de precipitação em diferentes locais distantes desde centenas de metros até dezenas de quilômetros do litoral. Esta análise não tem como objetivo apontar uma tecnologia superior entre os dois perfiladores analisados, mas investigar o desempenho destes equipamentos em situações corriqueiras para a indústria eólica e determinar as influências e em quanto tempo o equipamento volta às condições normais de perfilamento do vento em cada situação durante e após eventos de chuva de diferentes intensidades e durações. Esta investigação é executada com o suporte de 14 meses de observações em uma região com estações de seca e de chuva bem definidas, com duração aproximadamente iguais.

1.2 Objetivo

Nesta seção, delimitam-se o propósito central e as metas específicas desta investigação, estabelecendo as diretrizes necessárias para a condução do estudo e a posterior verificação da tese apresentada.

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de perfiladores remotos (SODAR e LIDAR) durante eventos de precipitação em diferentes locais do Maranhão, avaliando a influência da chuva na disponibilidade, alcance e confiabilidade das medições para aplicações na indústria eólica.

1.2.2 Objetivo específico

- Investigar a influência da consistência e do acumulado de precipitação no desempenho do SODAR.
- Avaliar a influência de diferentes intensidades e consistências de precipitação na DA do SODAR.

- Investigar a representatividade das medições do SODAR em condições de chuva, por meio da correlação com dados de anemômetros de referência.
- Examinar o desempenho do LIDAR em regiões próximas e distantes do litoral durante e após eventos de precipitação.
- Identificar os tempos de recuperação do desempenho dos perfiladores após a ocorrência de chuvas.
- Analisar possíveis fatores secundários (como direção do vento e nebulosidade) que possam influenciar a disponibilidade de alcance do LIDAR em diferentes localidades.
- Comparar os comportamentos de ambos os perfiladores sob condições de chuva, sem o intuito de apontar uma tecnologia superior, mas sim de compreender suas limitações e potencialidades para aplicações em campanhas de medição eólica.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos principais, incluindo o capítulo introdutório, organizados de forma a guiar o leitor desde a fundamentação teórica até as conclusões práticas sobre o desempenho dos sensores.

O Capítulo 2 estabelece a fundamentação teórica, abordando a dinâmica da Camada Limite Atmosférica (CLA) e os princípios físicos do sensoriamento remoto ativo, como o efeito Doppler utilizado pelo SODAR e LIDAR.

O Capítulo 3 detalha a metodologia aplicada, descrevendo os locais de medição no Maranhão (Barreirinhas e Paulino Neves), os equipamentos utilizados e os critérios definidos para as análises de disponibilidade de alturas (DA) e alcance máximo (Amax).

O Capítulo 4 expõe e discute os resultados obtidos, comparando quantitativamente o comportamento do SODAR e do LIDAR durante e após eventos de precipitação, além de analisar fatores secundários como nebulosidade e direção do vento.

O Capítulo 5 encerra o trabalho com as considerações finais, sintetizando as descobertas sobre as limitações e potencialidades de cada tecnologia e oferecendo recomendações para futuras pesquisas no setor eólico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A camada limite atmosférica

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é definida como a porção inferior da troposfera diretamente influenciada pela superfície terrestre. Segundo a definição clássica de Stull (1988), essa camada responde às forças superficiais em escalas de tempo de aproximadamente uma hora ou menos, ou seja, ela é a região onde o clima e o vento são alterados quase instantaneamente pelo calor do sol ou pelo relevo do terreno, tornando-a a camada mais dinâmica e turbulenta de toda a troposfera. É o ambiente onde ocorre toda a interação mecânica entre o fluxo atmosférico e os aerogeradores, sendo caracterizada por uma turbulência onipresente, originada tanto por instabilidades térmicas (convecção) quanto mecânicas (atrito).

A espessura da CLA é dinamicamente variável: pode oscilar de algumas dezenas de metros durante noites estáveis até atingir 4 quilômetros ou mais em condições de forte convecção diurna.

2.1.1 Estrutura Vertical e ciclo diário da CLA

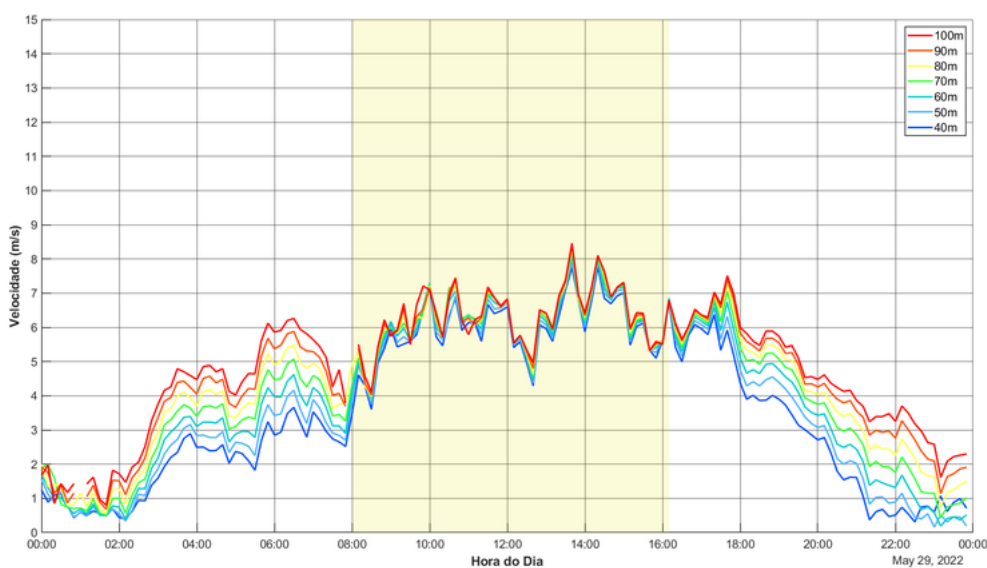
A estrutura da CLA evolui significativamente ao longo de um ciclo de 24 horas, impulsionada pelo balanço entre o aquecimento solar e o resfriamento radiativo da superfície.

- Período Diurno (Convectivo): Sob a influência da radiação solar, formam-se plumas térmicas que sobem adiabaticamente. Esse processo estabelece a Camada de Mistura ou Camada Limite Convectiva (*Convective Boundary Layer* - CBL), onde movimentos turbulentos intensos homogeneizam a temperatura potencial e a umidade com a altura.
- Período Noturno (Estável): Com a ausência de sol, a superfície resfria-se por emissão de radiação de onda longa, estabilizando a porção inferior e formando a Camada Limite Estável (*Stable Boundary Layer* - SBL). Nessa fase, a turbulência é suprimida pela estratificação térmica e o escoamento pode se desacoplar da superfície, favorecendo o surgimento de Jatos de Baixos Níveis (*Low Level Jets* - LLJ).
- Camada Residual: Acima da SBL noturna, permanecem os remanescentes da mistura do dia anterior, formando uma zona que retém características turbulentas prévias até ser reabsorvida pelo crescimento da nova CBL no dia seguinte.

A dinâmica da CLA pode ser observada empiricamente na Figura 2.1, que apresenta o perfil de vento obtido via LIDAR em Barreirinhas (29/05/2025). Nos períodos iniciais e finais do dia, nota-se uma nítida estratificação das velocidades, característica da Camada

Limite Estável (SBL); nesse regime, o resfriamento radiativo da superfície inibe a turbulência, resultando em um escoamento com acentuado cisalhamento. Em contraste, o período diurno (destacado em amarelo) evidencia a formação da Camada Limite Convectiva (CBL). O aquecimento superficial promove a convecção térmica, que homogeneiza o escoamento através de uma mistura turbulenta eficiente — fenômeno visível pela convergência das velocidades em diferentes altitudes.

Figura 2.1 – Velocidade do Vento - Dia: 29/05/2022



Fonte: Autor

A figura mostra a velocidade do vento. As medidas foram feitas pelo equipamento LIDAR. Foram sete alturas diferentes: 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m e 100 m. O período analisado foi de 24 horas. Começou às 00:00h e terminou às 23:50h.

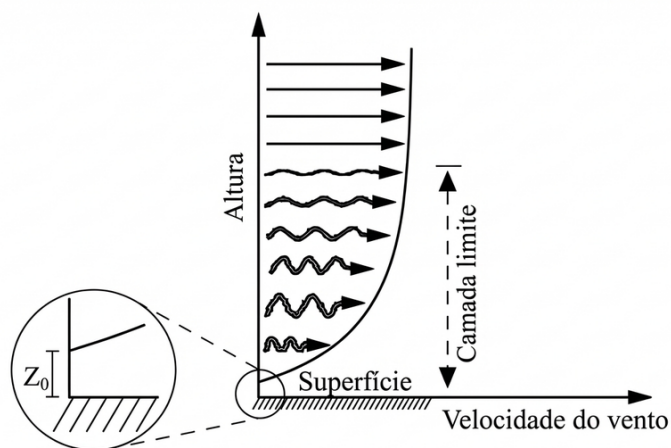
A transição para a atmosfera livre é delimitada pela inversão de capeamento, uma zona de alta estabilidade estática que funciona como um “teto” para turbulência, umidade e poluentes. Para a indústria eólica, essa dinâmica é crucial: aerogeradores modernos operam em zonas de transição onde as pás atravessam diferentes subcamadas da CLA, expondo-se a regimes de cisalhamento e turbulência variados ao longo do dia (Lang, 2011).

A base da CLA, correspondente aos primeiros 10% de sua profundidade total, é classificada por Stull (1988) como a Camada Superficial. Nesta região, as forças de atrito são predominantes e o cisalhamento do vento (a variação da velocidade com a altura) é extremamente intenso, fruto do arrasto direto provocado pela rugosidade do solo.

Conforme ilustrado na Figura 2.2, o perfil vertical da velocidade do vento demonstra esse comportamento logarítmico característico. Próximo à superfície, a velocidade é reduzida drasticamente devido à fricção, atingindo teoricamente o valor zero na altura de rugosidade (z_0), detalhada no destaque da imagem. Dentro da Camada Limite (CL),

observa-se que o fluxo é marcado por turbulência e variações bruscas, representadas pelas setas onduladas, até que o efeito do atrito se torne desprezível e o vento atinja a velocidade do escoamento livre na atmosfera superior.

Figura 2.2 – Perfil vertical da velocidade do vento



Fonte: Martins et al., 2008

Historicamente, a maioria das medições anemométricas era realizada dentro desta faixa, o que permitia o uso de modelos matemáticos simplificados para prever o comportamento do fluxo. Ou seja, como as torres de medição eram baixas, bastava entender a física “simples” da camada grudada ao chão para estimar o vento.

Contudo, o cenário mudou com o advento das turbinas de grande porte. Atualmente, a área de varredura do rotor (o círculo formado pelas pás) estende-se muito além da camada superficial:

- Alcance: As pás agora penetram na Camada de Mistura (durante o dia) ou na Camada Estável (durante a noite).
- Complexidade: Nessas altitudes mais elevadas, o escoamento deixa de ser dominado apenas pelo atrito do solo e passa a sofrer influências de fenômenos mais complexos, aumentando drasticamente o desafio de prever as cargas estruturais e o rendimento energético.

2.1.2 Fundamentação Matemática do Perfil Vertical do Vento

A variação da velocidade do vento com a altura, ou cisalhamento vertical, é um dos parâmetros mais críticos para o projeto de turbinas, influenciando tanto a produção de energia quanto as cargas estruturais de fadiga (UL SOLUTIONS, [s. d.]). Existem dois modelos matemáticos principais utilizados para descrever esta variação: a Lei Logarítmica e a Lei de Potência.

A Lei Logarítmica é derivada da teoria de similaridade de Monin e Obukhov (1954) e baseia-se na física do transporte de momento em condições de neutralidade atmosférica. Ela expressa a velocidade do vento na altura como:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

Em que, u_* representa a velocidade de fricção, k é a constante de von Kármán (aproximadamente 0,4) e z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica. O parâmetro z_0 é uma medida teórica da altura acima do solo onde a velocidade do vento se anularia devido ao atrito com os obstáculos superficiais.

A aplicação da Lei Logarítmica exige um conhecimento detalhado da superfície circundante. Obstáculos como edifícios, vegetação e variações topográficas aumentam a rugosidade, retardando o vento próximo ao solo e gerando um cisalhamento mais pronunciado. A Tabela 2.1 apresenta comprimentos de rugosidade típicos para diferentes ambientes.

Tabela 2.1 – Valores de referência para o comprimento de rugosidade aerodinâmica conforme a natureza do terreno

Descrição do Terreno	Comprimento de Rugosidade (z_0) [m]
Superfície de gelo ou lama muito lisa	0,00001
Mar aberto calmo	0,0002
Neve	0,003
Gramma de pastagem	0,008
Campos de cultivo	0,05
Florestas e bosques	0,5
Centros urbanos com edifícios altos	3

Fonte: HOMER Energy, 2025.

Devido à dificuldade de medir a velocidade de fricção e definir a estabilidade atmosférica em tempo real, a indústria eólica utiliza frequentemente a Lei de Potência como uma alternativa empírica (MONTANA DEQ, 2025). A relação é dada por:

$$u(z) = u_{ref} * \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

Em que, u_{ref} é a velocidade em uma altura de referência (geralmente 10 metros ou a altura de uma torre anemométrica) e α é o expoente de cisalhamento. Embora o valor de $\alpha = 1/7$ 0,143 seja comumente assumido para superfícies terrestres abertas em condições neutras, este parâmetro é altamente sensível à estabilidade da CLA.

A limitação fundamental desses modelos é que eles assumem um perfil de vento de crescimento uniforme. No entanto, em alturas superiores a 150 m, a presença de jatos de baixos níveis pode criar perfis onde a velocidade máxima ocorre no meio da área de

varredura das pás, seguida por uma redução da velocidade com a altura. Medir o vento a 40 m e extrapolar para 260 m utilizando uma lei de potência constante pode levar a erros graves na estimativa do recurso eólico, pois ignora essas complexidades estruturais da CLA superior.

2.1.3 Evolução Tecnológica: Do Anemômetro Mecânico ao Sensoriamento Remoto

A necessidade de medir o vento em alturas cada vez maiores impulsionou a transição das torres anemométricas (*Met Masts*) para os sistemas de sensoriamento remoto (Remote Sensing - RS). Enquanto uma torre fixa exige investimentos massivos em fundações e estruturas metálicas para atingir alturas superiores a 100 m, os sistemas LIDAR e SODAR são dispositivos de solo, portáteis e capazes de medir perfis completos de vento até centenas de metros (Lang, 2011).

Os sensores remotos operam baseados no efeito Doppler, medindo a mudança de frequência de sinais (luz ou som) que são retroespalhados pela atmosfera. Esta tecnologia permite não apenas medir a velocidade do vento em um ponto, mas obter um perfil vertical detalhado com resolução de poucos metros.

Uma vantagem crítica é a capacidade de medir a Velocidade do Vento Equivalente ao Rotor (*Rotor Equivalent Wind Speed - REWS*) (Martins et al., 2023). Diferente de um anemômetro pontual, a metodologia REWS integra a energia cinética do vento ao longo de toda a área circular varrida pelas pás, fornecendo uma métrica muito mais precisa para a produção de energia, especialmente em condições de cisalhamento extremo.

Além disso, a facilidade de deslocamento permite que um único sensor RS realize campanhas de medição em diversos pontos de um futuro parque eólico, mapeando a variabilidade espacial do recurso com um custo até 37% menor do que o uso de múltiplas torres (WINDSYSTEMSMAG, [s. d.]).

2.2 PRINCÍPIOS DE SENSOREAMENTO REMOTO ATIVO NA ATMOSFERA

O sensoriamento remoto na meteorologia eólica baseia-se na capacidade de obter informações atmosféricas sem contato direto com o ar monitorado. Conforme destacam Quartaroli, Vicente e Araujo (2014), essa disciplina divide-se fundamentalmente nos domínios passivo e ativo. No caso dos sensores passivos, como os radiômetros de satélites, a captação ocorre via radiação solar ou emissão térmica. Contudo, essa técnica possui limitações no perfilamento vertical das camadas inferiores da atmosfera devido às bandas de absorção e à necessidade de fontes externas de energia.

Em contrapartida, as tecnologias SODAR e LIDAR são classificadas como sistemas de sensoriamento remoto ativo (CONCERT TECHNOLOGIES, 2025). Estes instrumentos atuam como transceptores, o que significa que eles geram e emitem o seu próprio sinal

de energia para a atmosfera — pulsos sonoros no caso do SODAR e feixes de laser no caso do LIDAR — e subsequentemente medem o sinal que retorna após interagir com o meio. Esta natureza ativa confere a esses sistemas uma autonomia operacional crucial, permitindo medições contínuas independentemente da iluminação solar ou de condições térmicas superficiais específicas (LANDBERG, 2016).

2.2.1 A Natureza do Alvo Atmosférico: Aerossóis e Inhomogeneidades

Um ponto fundamental para a fundamentação teórica destas tecnologias é a compreensão de que o vento, em sua essência puramente gasosa, é invisível aos sensores ópticos e inaudível aos sensores acústicos em condições laminares ideais. O “alvo” do sensoramento remoto não é o vento em si, mas sim o que o vento transporta ou as perturbações físicas que ele induz no meio. Para que haja um sinal de retorno (retroespalhamento).

No caso do LIDAR, os alvos primários são os aerossóis: minúsculas partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, como poeira, pólen, cristais de sal marinho e poluentes. O vento atua como o vetor que transporta essas partículas; ao medir a velocidade desses aerossóis, o LIDAR infere, com altíssima precisão, a velocidade do vento que os carrega. Já o SODAR utiliza como alvo as inhomogeneidades térmicas da atmosfera. Flutuações na temperatura causam pequenas mudanças locais na densidade do ar, criando o que se conhece como “bolhas” ou turbilhões térmicos. Essas variações na estrutura termodinâmica do ar funcionam como alvos que refletem as ondas sonoras emitidas pelo equipamento (LANDBERG, 2016).

Tabela 2.2 – Características técnicas do SODAR e LIDAR

Característica Técnica	SODAR (Acústico)	LIDAR (Óptico)
Fonte de Energia	Pulsos de som (ondas mecânicas)	Feixes de laser (ondas eletromagnéticas)
Mecanismo de Detecção	Retroespalhamento de flutuações térmicas	Retroespalhamento de aerossóis/partículas
Frequência de Operação	1 kHz a 5 kHz	Infravermelho próximo (ex: 1,5 μm)
Meio de Interação	Flutuações de densidade atmosféricas	Partículas físicas em suspensão
Natureza do Sensor	Ativa	Ativa

Fonte: Autor.

Esta diferenciação é vital para entender por que certas condições climáticas, como a chuva, afetam cada sensor de maneira distinta. Enquanto o LIDAR pode “sofrer” em atmosferas extremamente limpas pela falta de aerossóis, o SODAR pode ter seu alcance limitado em atmosferas termicamente estáveis onde não há gradientes de temperatura para refletir o som.

2.2.2 Fundamentação Física do Efeito Doppler

A base matemática e física para a conversão do sinal de retorno em dados de velocidade é o Efeito Doppler. Descrito pela primeira vez em 1842, este princípio postula que a frequência de uma onda percebida por um observador muda quando há movimento relativo entre a fonte e o alvo (LANG, 2011). Nos perfiladores remotos, este deslocamento de frequência (Δf) é diretamente proporcional à velocidade radial do vento na direção do feixe emitido (SKOLNIK, 2001).

A equação simplificada que rege esse processo desse Desvio Doppler pode ser expressa como:

$$\Delta f = \frac{2 * V_r}{\lambda} \quad (2.3)$$

Em que, V_r é a velocidade radial e λ é o comprimento de onda da radiação emitida. O fator 2 decorre do fato de o sinal percorrer o caminho de ida e volta (sensor-alvo-sensor). Como os perfiladores são projetados para medir o vento em três dimensões, eles utilizam múltiplos feixes inclinados em relação ao zênite. Ao combinar as velocidades radiais obtidas em diferentes ângulos, algoritmos de reconstrução do campo de vento.

Embora o princípio seja o mesmo, a aplicação prática difere substancialmente entre as tecnologias. O LIDAR utiliza comprimentos de onda extremamente curtos (na ordem de micrômetros). Como a velocidade da luz é muito alta, os deslocamentos de frequência são pequenos em termos relativos, exigindo técnicas de detecção heteródina — onde o sinal de retorno é misturado com um oscilador local estável para extrair a frequência de batimento Doppler (WEI et al., 2025).

O SODAR, operando com ondas sonoras que viajam a aproximadamente 340 m/s, lida com mudanças de frequência muito mais pronunciadas em termos percentuais, já que a velocidade do vento é uma fração significativa da velocidade do som. No entanto, a velocidade do som é sensível à temperatura e umidade, o que exige que o SODAR monitore constantemente esses parâmetros para corrigir o cálculo da velocidade radial.

2.2.3 A Relação Sinal-Ruído como Métrica de Desempenho

A Relação Sinal-Ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) é, talvez, o parâmetro mais crítico na operação de perfiladores remotos. Ela define a capacidade do sistema de distinguir o sinal retroespalhado pelos alvos atmosféricos do ruído de fundo indesejado. Em termos de engenharia, o SNR é a razão entre a potência do sinal útil e a potência do ruído, geralmente expressa em decibéis (dB) conforme (HAYKIN; MOHER, 2011):

$$SNR(dB) = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right) \quad (2.4)$$

Um SNR elevado garante que o pico Doppler no espectro de frequência seja nítido e facilmente identificável. À medida que a altitude de medição aumenta, a potência do sinal de retorno diminui drasticamente, seguindo a lei do inverso do quadrado da distância e sofrendo atenuação atmosférica. Simultaneamente, o ruído permanece constante ou pode até aumentar devido a fontes ambientais, levando a uma degradação do SNR com a altura.

3 METODOLOGIA

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos na região de Barreirinhas e Paulino Neves, Maranhão, Brasil. Trata-se de uma região da costa brasileira com alta disponibilidade de recurso eólico, sobretudo devido à ação dos ventos alísios em toda a costa equatorial. Investigações anteriores, como (Assireu et al., 2022; Pimenta et. al., 2023), descreveram preliminarmente os fluxos atmosféricos na região equatorial, apontando processos físicos que modificam a estrutura da camada limite atmosférica, impactando a velocidade, a direção, o cisalhamento vertical e a turbulência do vento.

3.1 Aquisição de dados

Nesta investigação foram utilizados dados provenientes de diversos sensores. O perfil vertical do vento (velocidade horizontal e direção) foram analisados utilizando o LIDAR Windcube V2 da Leosphere e o SODAR MFAS da Scintec. As observações foram realizadas em 20 altitudes distintas, variando de 40 a 200 m, com intervalos de 10 m, e nas alturas de 220 m, 240 m e 260 m, com médias de 10 min.

Além do perfil vertical do vento, foram coletadas variáveis meteorológicas de uma estação micrometeorológica instalada ao lado dos dois perfiladores de vento durante toda a campanha. A precipitação foi medida com um pluviômetro de balança, com precisão de 0,1 mm, e os dados foram processados em acumulados de 1 min. A velocidade do vento a 10 m do solo foi registrada por um anemômetro sônico 2D. A temperatura foi monitorada por um termo-higrômetro instalado a 3 m do solo.

3.2 Localização e intervalo de medição dos sensores.

Durante o período de medição, o LIDAR operou em diversos pontos conforme descrito na Tabela 5.1 com o objetivo de detectar as variações sazonais dos recursos eólicos em diversos pontos a partir do litoral

O SODAR funcionou no ponto P1, descrito na Tabela 5.1, no período de 16 setembro de 2021 a 27 de julho de 2022, representando 312 dias.

Em função dos diferentes locais em que o LIDAR foi colocado, a análise de seus dados foi separada em dois conjuntos, (1) próximo ao litoral abrangendo os pontos P0, P1, P2, P3, P6 e P7, e (2) afastado do litoral, abrangendo os pontos P4 e P5, da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Pontos geográficos e intervalos de operação do LIDAR

Período	Ponto	Dias	Localização	Distância do mar
16SET2021-09NOV2021	P1	54	2°43'29.6"S 42°34'30.7"W	5 Km
12NOV2021-15DEZ2021	P0	33	2°41'38.8"S 42°33'17.3"W	1.6 Km
15DEZ2021-27JAN2022	P2	44	2°43'30.6"S 42°36'23.4"W	7.8 Km
28JAN2022-18ABR2022	P3	80	2°44'00.7"S 42°35'22.3"W	7.1 Km
20ABR2022-13JUN2022	P4	54	2°45'32.5"S 42°48'25.7"W	24 Km
15JUN2022-27JUL2022	P5	42	2°47'14.5"S 42°51'20.6"W	30 Km
29JUL2022-15SET2022	P6	48	2°44'00.7"S 42°35'22.3"W	7 Km
16SET2022- 08NOV2022	P7	53	2°43'30.6"S 42°36'23.4"W	7.8 Km

Fonte: Autor.

Figura 3.1 – Representação geográfica dos pontos P0 ao P7 no mapa

Fonte: Adaptado Google Maps

3.3 Critérios de análise de dados

Para conduzir o desenvolvimento deste estudo, foram estabelecidos critérios e métricas próprias, que serviram como parâmetros de avaliação para os resultados obtidos:

3.3.1 Disponibilidade de alturas (DA)

A razão entre o número de alturas em que houve observações de vento realizadas em cada leitura e o número total de alturas definidas para o perfil vertical do sensor, pode ser expressa por:

$$DA = \frac{\text{quantidade de alturas observadas}}{20} \quad (3.1)$$

3.3.2 Alcance máximo (Amax)

Representa o maior alcance em que o equipamento foi capaz de estimar a velocidade do vento. O alcance máximo é uma métrica útil para indicar a perda de alcance do equipamento, pois as perdas tendem a ocorrer inicialmente nas altitudes mais elevadas. No entanto, em alguns eventos, as observações perdidas ocorreram em altitudes intermediárias, não afetando o alcance máximo. Para abordar essas perdas abrangentes foi utilizada a DA, que engloba todas as observações feitas pelo equipamento.

3.3.3 Eventos de precipitação

Os eventos foram caracterizados como o acumulado de precipitação que ocorre em um intervalo de 10 min (começando com a hora cheia).

Cada evento tem como parâmetros:

- Acumulado (AC10): somatório dos acumulados de chuva de 1 min que ocorreram dentro do intervalo de 10 min;
- Consistência (CON10): quantidade de acumulados de 1 min presentes no intervalo de 10 min.

3.3.4 Eventos de precipitação contínuos

Eventos de precipitação que ocorreram de forma consecutiva ou que ocorreram no máximo 20 min após o anterior.

Cada evento contínuo tem como parâmetros:

- Duração total da precipitação: Intervalo entre início e fim da precipitação em intervalos fechados de 10 min.
- Duração efetiva da precipitação: Apenas os intervalos de tempo (resolução de 1 min) em que realmente houve precipitação dentro da duração total do evento.
- Acumulado (ACE): Volume de precipitação que ocorreu durante o evento.
- Consistência (CONE): Razão entre a quantidade de intervalos de tempo (1 min) em que houve precipitação e a duração total do evento.

3.3.5 Queda de DA acumulado

As quedas de DA foram caracterizadas a partir dos seguintes parâmetros:

- Tempo pós precipitação: tempo em que levou do fim do evento até a primeira queda de DA.
- Duração da queda de DA: duração em que persistiu a queda de DA.
- DA médio: média de DA's obtidos durante o tempo da queda.

3.3.6 Correlação entre o vento na altura mais baixa do perfilador e o vento observado pelo anemômetro a 10 m

Considerando que os registros de vento durante a precipitação podem apresentar valores distorcidos, a correlação de Pearson foi utilizada para analisar a representatividade dos dados de velocidade do vento observados durante o evento de precipitação.

O coeficiente de Pearson (PEARSON, 1896) foi usado para avaliar se houve alguma distorção entre a velocidade do vento observada pelo anemômetro da torre micrometeorológica, localizada a 10 m de altura, e a velocidade do vento observada pelo equipamento em sua altura operacional mais baixa. Se os valores de correlação fossem significativamente menores durante os eventos de precipitação em comparação aos dias sem precipitação, isso sugeriria que a precipitação interferiu na qualidade das observações, comprometendo sua representatividade.

Por outro lado, se os valores de correlação permanecessem consistentes independentemente da presença de precipitação, isso indicaria que as observações durante os eventos de precipitação ainda são representativas e confiáveis.

O coeficiente de Pearson (r_{xy}) é uma medida de valor único de associação entre duas variáveis x e y , sendo a razão das suas covariâncias com o produto dos seus desvios padrões, cujo valor ideal é igual a 1, descrito (PEARSON, 1896):

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.2)$$

Em que, o numerador representa a somatória dos produtos dos desvios de cada observação (x_i e y_i) em relação às suas respectivas médias (\bar{x} e \bar{y}), o que caracteriza a covariância entre os conjuntos de dados. Já o denominador atua como um fator de normalização, utilizando as raízes quadradas das somas dos quadrados dos desvios (relacionadas à variabilidade individual de cada variável).

3.4 Etapas da análise

Para o SODAR, a análise concentrou-se na relação entre a consistência e a acumulação de chuva em intervalos de 10 minutos e a DA. A média e o desvio padrão da DA para cada intervalo de chuva foram calculados, permitindo a identificação das condições de precipitação que exerceram a influência mais significativa no desempenho do equipamento.

Além disso, foi verificado se as observações feitas pelo SODAR durante eventos de chuva permaneceram representativas ou se foram significativamente afetadas. Para esta análise, a velocidade do vento registrada pelo anemômetro mais alto (a 10 m) da torre micrometeorológica foi correlacionada com a velocidade estimada pelo SODAR em seu alcance mais baixo (30 m), comparando os dados de dias secos com aqueles obtidos durante eventos de precipitação.

Já para o LIDAR, as análises foram conduzidas separadamente para os períodos de operação em regiões próximas e distantes da costa. As atividades para o LIDAR próximo à costa seguiram os mesmos passos aplicados ao SODAR; no entanto, a precipitação e a DA foram analisadas como eventos contínuos, em vez de intervalos fixos de 10 minutos.

Essa abordagem possibilitou avaliar os efeitos prolongados da precipitação na DA, considerando as quedas acumuladas mesmo após o término dos eventos. Por fim, a correlação de Pearson foi aplicada entre os vários parâmetros monitorados para verificar a existência de comportamentos dependentes entre eles.

Para tal análise, a velocidade do vento registrada pelo anemômetro mais alto (a 10 m) da torre micrometeorológica foi correlacionada com a velocidade do vento medida pelo LIDAR em seu alcance mais curto, a 40 m. Para os casos em que o LIDAR está longe da costa, foram seguidos os mesmos passos do SODAR, com adaptações específicas para as condições ambientais da região.

Além de analisar a influência da precipitação, fatores secundários como a direção do vento e a nebulosidade também foram analisados, uma vez que podem influenciar o desempenho dos perfiladores. A influência da direção do vento na DA foi analisada agrupando as direções em quadrantes. Deu-se preferência às altitudes mais elevadas para determinar a direção do vento, uma vez que as perdas de alcance tendem a começar nessas altitudes. Além disso, a variação diária da temperatura foi considerada um indicador indireto para avaliar a nebulosidade. As variações diárias de temperatura foram comparadas com uma curva modelo de temperatura diária, permitindo analisar a correlação entre as variações de temperatura e a média diária da DA.

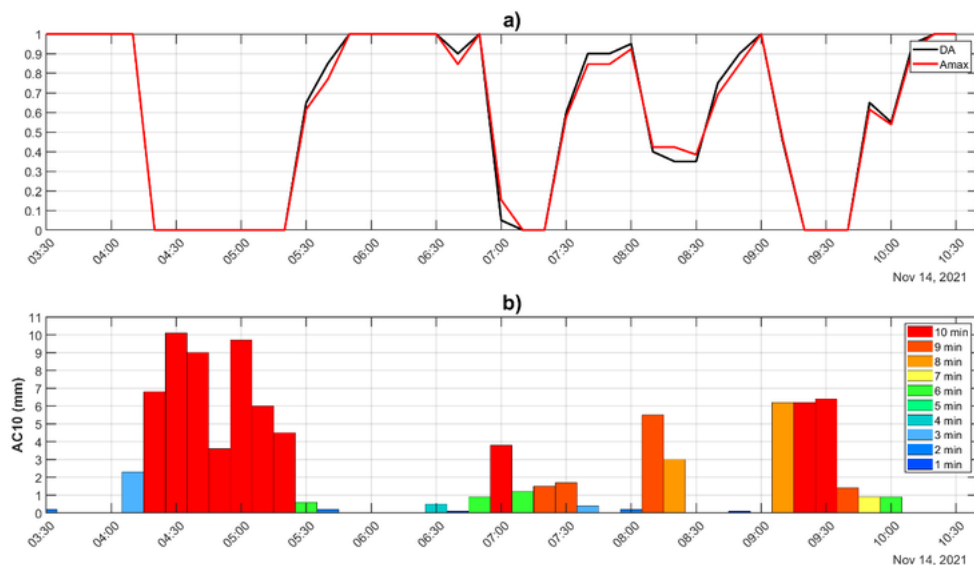
Todas as análises estatísticas descritas, incluindo o cálculo da Correlação de Pearson e o processamento dos sinais dos perfiladores, foram realizadas utilizando a plataforma MATLAB. A ferramenta foi fundamental para o tratamento das séries temporais e a modelagem das curvas de vento.

4 RESULTADOS

4.1 SODAR

Durante os eventos de precipitação, a perda do alcance do SODAR mostrou uma correlação com a CON10 e o AC10. No entanto, o padrão observado foi a rápida recuperação do alcance após o término da precipitação. Em outras palavras, as medições realizadas após o fim da precipitação geralmente retornam à sua funcionalidade plena na primeira sondagem após o término da precipitação. A Figura 4.1 ilustra o alcance do equipamento durante um período de funcionamento quando ocorreram vários eventos de precipitação, demonstrando a correlação analisada.

Figura 4.1 – Alcance do SODAR sob eventos de precipitação



Fonte: Autor.

A figura “a” exibe Amax (linha vermelha) e DA (linha preta) do SODAR em 14 de novembro de 2021, iniciando às 03:30h e finalizando às 10:30h. Na figura “b” o comprimento das barras representa os valores de AC10 e a cor de cada barra representa os valores de CON10.

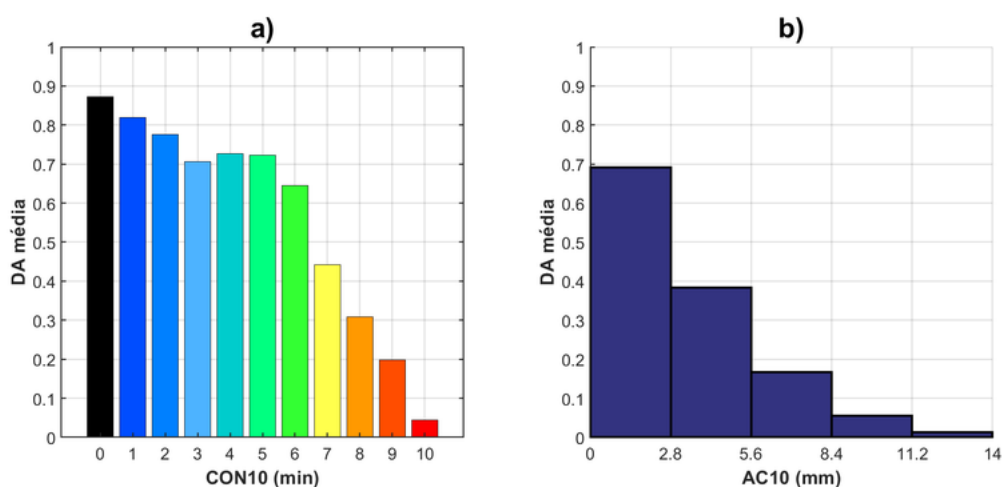
Embora o Amax e a DA tendam a apresentar valores semelhantes, suas definições diferem conforme explicado na Seção 3.3. Enquanto Amax representa o maior alcance em que o equipamento conseguiu estimar a velocidade do vento, DA indica a proporção de perda de dados, a qual pode ocorrer em alturas intermediárias sem necessariamente impactar o alcance máximo.

Dessa forma, para analisar a influência da precipitação na disponibilidade do equipamento foi verificada a partir de qual valor de CON10 a DA foi afetada.

A Figura 4.2a e a Tabela 4.1 apresentam a DA média em função da CON10. Observa-se que o SODAR exibiu uma DA variável mesmo em dias sem precipitação, com uma média de aproximadamente 87%. Essa variação basal é atribuída a outros fatores ambientais que influenciam o alcance máximo do equipamento, tais como a não-homogeneidade da temperatura atmosférica, a umidade do ar e o ruído ambiente. Adicionalmente, foi constatado um decréscimo acentuado da DA para valores de CON10 a partir de 7 minutos. Neste ponto, a DA média foi consistentemente encontrada abaixo de 50%, reduzindo-se gradualmente até atingir valores próximos de zero.

Tendo em vista esse resultado, serão considerados apenas eventos com valores de CON10 a partir de 7 min para as análises relativas ao desempenho do SODAR frente a eventos de precipitação. No Gráfico 4.2b e Tabela 4.2 são apresentadas as médias de DA para os eventos de acordo com 5 faixas de AC10. Analisando a Figura 4.2b e os registros da Tabela 4.2, observa-se que o SODAR apresentou uma queda de mais de 50% com relação à média DA para valores de AC10 superiores a 2,8 mm, reduzindo gradativamente à medida que houve aumento do AC10.

Figura 4.2 – DA média em relação à CON10 e ao AC10



Fonte: autor.

A figura “a” exibe a DA média para cada valor de CON10 variando de 0 a 10 min. A figura “b” retrata a DA média para intervalos de AC10 entre 0 a 14 mm, divididos em 5 subintervalos de mesmo tamanho.

Tabela 4.1 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10

CON10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de eventos	35.048	404	138	110	95	64	63	54	47	49	111
DA média	0,873	0,819	0,776	0,706	0,726	0,723	0,644	0,442	0,309	0,198	0,045
Desvio padrão	0,211	0,260	0,289	0,329	0,349	0,341	0,370	0,410	0,342	0,298	0,154
Coeficiente de variação	24%	32%	37%	47%	48%	47%	57%	93%	111%	150%	345%

Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10

AC10	0 a 2,8	2,9 a 5,6	5,7 a 8,4	8,5 a 11,2	11,3 a 14
Quantidade de eventos	992	80	37	18	8
DA média	0,692	0,383	0,167	0,055	0,012
Desvio padrão	0,359	0,410	0,348	0,235	0,035
Coeficiente de variação	52%	107%	208%	424%	283%

Fonte: Autor.

A análise das médias e desvios-padrão de CON10 e AC10 (Tabelas 4.1 e 4.2) revela que a perda de alcance (DA) é proporcional à intensidade e à constância da chuva. No entanto, conforme indicado na Tabela 4.3, quando a precipitação é ininterrupta (CON10 = 10 min), a redução da DA torna-se independente do volume acumulado.

Em contrapartida, intervalos com chuva intermitente (CON10 < 10 min) permitem a captura de dados nos momentos de estiagem, que são posteriormente integrados às médias do equipamento. Esse comportamento é corroborado pelo aumento do desvio-padrão relativo à média da DA conforme os índices de consistência e acumulação se elevam, refletindo a maior instabilidade nas medições sob tais condições.

Tabela 4.3 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em função de AC10 e CON10 (10 min)

AC10	0 a 2,8	2,9 a 5,6	5,7 a 8,4	8,5 a 11,2	11,3 a 14
Quantidade de eventos	27	32	30	16	6
DA média	0,056	0,058	0,050	0	0,017
Desvio padrão	0,199	0,121	0,192	0	0,041
Coeficiente de variação	358%	210%	384%	0%	245%

Fonte: Autor.

Ao separar os eventos de precipitação com CON10 de 7 a 10 min, também foram registrados os valores de DA para cada um desses eventos. Na Tabela 4.4, é apresentada a quantidade de vezes em que cada valor de DA foi registrado para cada CON10. Analisando

a Tabela 4.4, observa-se que a maior concentração de registros de DA ocorre próximo a DA igual a 0 para os valores de CON10 selecionados, partindo de 33,33% para consistência 7, subindo gradativamente para 83,78% para consistência 10. Para os demais valores de DA, há uma queda para valores iguais ou abaixo de 10%. Com base nessas informações, pode-se concluir que a CON10 tem um impacto significativo no desempenho do SODAR. Especificamente, quando o valor de CON10 atinge ou excede 7 min.

Tabela 4.4 – Distribuição da DA do equipamento em diferentes valores de CON10. A maior porcentagem para cada valor de CON10 está destacado em negrito

CON10	N° eventos	DA										
		0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0
7	54	18 33,33%	4 7,41%	3 5,56%	0 0,00%	2 3,70%	2 3,70%	2 3,70%	4 7,41%	3 5,56%	5 9,26%	11 20,37%
8	47	19 40,43%	2 4,26%	4 8,51%	4 8,51%	1 2,13%	2 4,26%	5 10,64%	3 6,38%	1 2,13%	2 4,26%	4 8,51%
9	49	27 55,10%	5 10,20%	1 2,04%	2 4,08%	4 8,16%	1 2,04%	3 6,12%	2 4,08%	2 4,08%	0 0,00%	2 4,08%
10	111	93 83,78%	8 7,21%	2 1,80%	4 3,60%	1 0,90%	1 0,90%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	0 0,00%	2 1,80%

Fonte: Autor.

A representatividade das medições do SODAR durante eventos de precipitação foi avaliada para determinar se as observações eram consistentes ou se a qualidade dos dados era afetada pela chuva. Idealmente, a comparação seria feita com um anemômetro instalado a uma altura comparável, o que não foi viável. Portanto, adotou-se a seguinte abordagem:

O SODAR foi instalado em uma área plana e livre de obstáculos.

Assumiu-se uma correlação entre o alcance mais baixo do SODAR (30 m) e um anemômetro sônico instalado a 10 m em uma torre micrometeorológica próxima.

A similaridade das correlações em condições com e sem precipitação foi utilizada como evidência de que a precipitação não degradava a qualidade dos dados.

Esta análise de correlação entre a velocidade do vento a 10 m (anemômetro) e a 30 m (SODAR) considerou dias com e sem precipitação, conforme detalhado na Tabela 4.4 e ilustrado nas Figuras 4.3 e 4.4 (Correlação de Pearson).

Devido ao gradiente vertical de vento, os registros do SODAR a 30 m foram sistematicamente superiores aos da torre a 10 m. Em condições de tempo seco (Figura 4.3), observou-se uma correlação forte ($R = 0,93$), o que ratifica a alta representatividade das medições. Já durante eventos de precipitação (Figura 4.4), a correlação reduziu para $R = 0,83$, evidenciando o aumento da dispersão dos dados e a consequente queda na confiabilidade do perfilador sob essas condições.

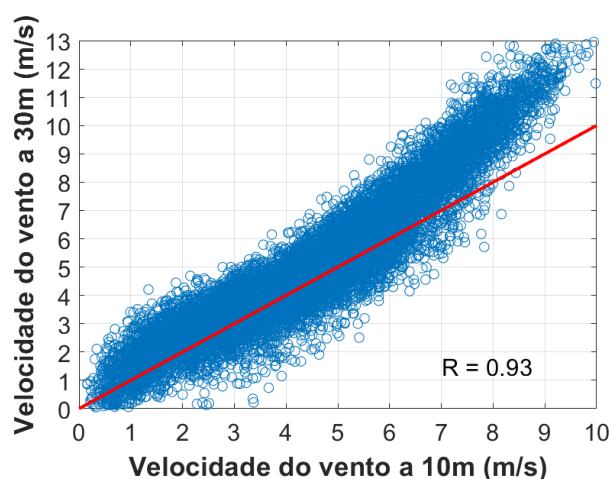
A análise do viés (bias) complementou essa conclusão, revelando valores de 0,65 sem precipitação e 0,06 com precipitação. Esses achados apoiam a conclusão de que, embora a precipitação introduza alguma variabilidade (evidenciada pela queda da correlação R), as medições do SODAR permanecem confiáveis e representativas sob tais condições.

Tabela 4.5 – Quantidade de eventos observados para cada situação

Eventos sem precipitação	12.773
Eventos com precipitação	741

Fonte: autor.

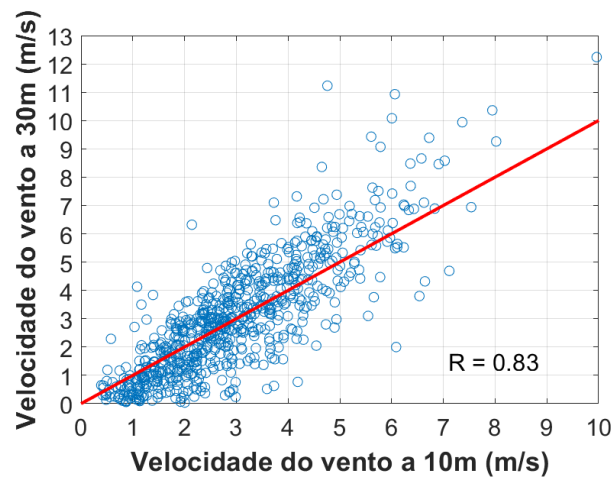
Figura 4.3 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 30 m sem precipitação



Fonte: Autor.

A Figura 4.3 mostra a dispersão da velocidade do vento a 10 m em relação à velocidade do vento a 30 m quando não havia ocorrência de eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

Figura 4.4 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 30 m com precipitação



Fonte: Autor.

A Figura 4.4 retrata essa mesma dispersão durante eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

O comportamento da DA demonstrou que o SODAR é fortemente afetado pela precipitação, porém o retorno à DA típica acontece, consistentemente, logo após o término da precipitação.

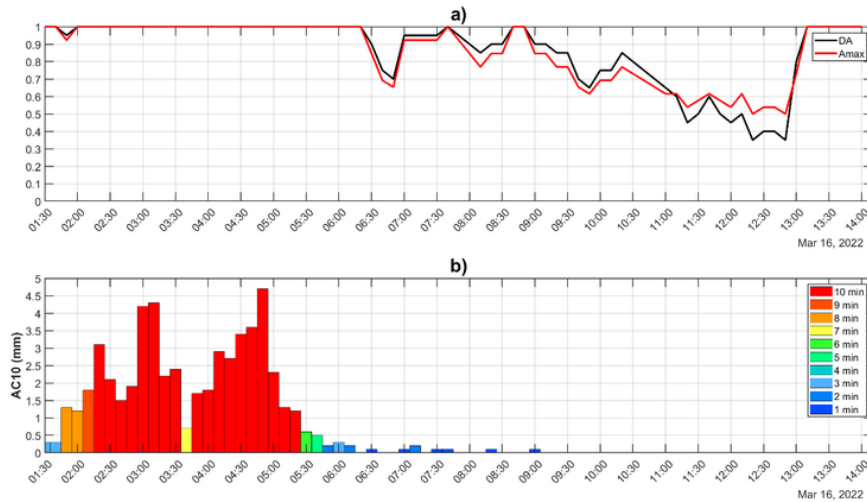
4.2 LIDAR

O LIDAR operou em vários locais, o que permitiu analisar seu desempenho em diferentes ambientes. Assim, as duas situações principais analisadas foram com o LIDAR posicionado nas proximidades do litoral e quando foi utilizado em localizações mais distantes do litoral. Para a análise de desempenho próximo à costa, foram selecionados os pontos P0, P1, P3, P6 e P7, os quais estão localizados a menos de 8 km de distância do litoral. Para a análise de desempenho no interior do continente, foram selecionados os pontos P4 e P5 que ficam localizados a uma distância superior a 20 km do litoral (vide Tabela 4.1).

4.2.1 LIDAR próximo do litoral

As atividades do LIDAR, nesta região, durante os eventos de precipitação mostraram que o alcance tem pouca correlação com a CON10 no mesmo intervalo. Foi notado que após alguns conjuntos de eventos de precipitação (cerca de 13%) ocorria uma queda gradual do alcance no decorrer do tempo até o retorno do desempenho esperado, como mostra a Figura 4.5.

Figura 4.5 – Alcance do LIDAR próximo do litoral durante eventos de precipitação



Fonte: Autor.

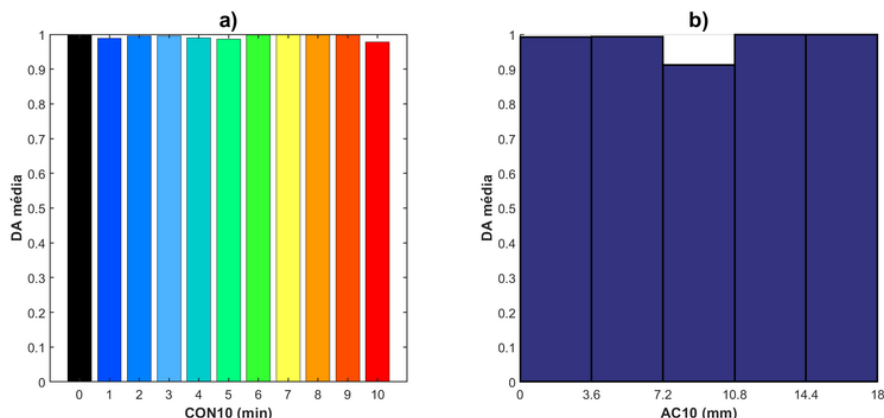
A figura “a” exibe Amax (linha vermelha) e DA (linha preta) do equipamento em 16 de março de 2022, iniciando às 01:30h e finalizando às 14:30h. Na figura “b” o comprimento das barras representa os valores de AC10 e a cor de cada barra representa os valores de CON10.

É notável que, durante o evento de chuva extrema ilustrado na Figura 4.5, o desempenho do LIDAR não foi afetado no momento da ocorrência. Este fato demonstra ainda mais a robustez do equipamento sob condições de precipitação de alta intensidade.

Para reforçar a afirmação sobre a pouca correlação do alcance com a precipitação no momento de sua ocorrência, analisou-se a influência da precipitação na DA do equipamento em função de sua CON10 e AC10.

Na Figura 4.6, Tabelas 4.6 e 4.7 são apresentadas as médias de DA para os eventos em função de sua CON10 e de seu AC10. Na análise do gráfico e tabelas referidas observa-se uma variação estatística mínima, indicando que a precipitação não tem influência na DA durante sua ocorrência.

Figura 4.6 – DA média em relação à CON10 e ao AC10



Fonte: Autor.

A figura “a” exibe a DA média para cada valor de CON10 indo de 0 a 10 min. A figura “b” retrata a DA média para intervalos de AC10 entre 0 a 18 mm, divididos em 5 subintervalos de mesmo tamanho.

Tabela 4.6 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10

CON10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de eventos	38671	287	118	81	58	43	43	42	39	40	78
DA média	0,998	0,989	0,995	0,996	0,991	0,986	0,998	1,000	0,999	0,999	0,978
Desvio padrão	0,026	0,045	0,030	0,025	0,072	0,064	0,011	0,000	0,008	0,008	0,116
Coeficiente de variação	3%	5%	3%	2%	7%	6%	1%	0%	1%	1%	12%

Fonte: Autor.

Tabela 4.7 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10

AC10	0 a 3,6	3,6 a 7,2	7,2 a 10,8	10,8 a 14,4	14,4 a 18
Quantidade de eventos	768	37	16	6	2
DA média	0,993	0,993	0,913	1,000	1,000
Desvio padrão	0,040	0,041	0,242	0,000	0,000
Coeficiente de variação	4%	4%	27%	0%	0%

Fonte: Autor.

A representatividade das medições de velocidade do vento do LIDAR durante eventos de precipitação foi avaliada para determinar se as observações eram consistentes ou se eram afetadas pela chuva.

Visto que a instalação de um anemômetro a uma altura comparável (40 m) não foi viável, adotou-se a seguinte abordagem:

O LIDAR foi instalado em uma área plana e livre de obstáculos.

Assumiuiu-se uma correlação entre o alcance mais baixo do LIDAR (40 m) e um anemômetro sônico instalado a 10 m em uma torre micrometeorológica próxima.

A estabilidade das correlações em ambos os cenários atmosféricos evidenciou que a precipitação não degradou a qualidade dos dados do LIDAR. Para essa análise, comparou-se a velocidade do vento a 10 m (anemômetro) com a registrada a 40 m (LIDAR), cujos quantitativos de observações e distribuições de Pearson estão detalhados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.7 e 4.8. Devido ao gradiente vertical, os valores do LIDAR foram sistematicamente superiores aos da torre. Notavelmente, a correlação manteve-se em $R = 0,96$, sem apresentar redução durante os eventos de precipitação, o que confirma a resiliência das medições sob essas condições.

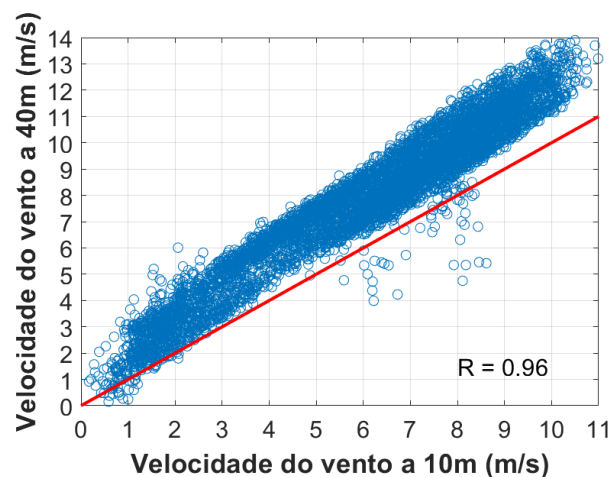
Adicionalmente, a análise do viés (bias) revelou valores de 1,80 para eventos sem precipitação e 1,48 para eventos com precipitação, refletindo a diferença esperada nas velocidades médias do vento entre 10 e 40 m. Esses achados confirmam que o desempenho e a representatividade das medições do LIDAR não foram prejudicados pela precipitação.

Tabela 4.8 – Quantidade de eventos observados para cada situação

Eventos sem precipitação	12.094
Eventos com precipitação	498

Fonte: Autor.

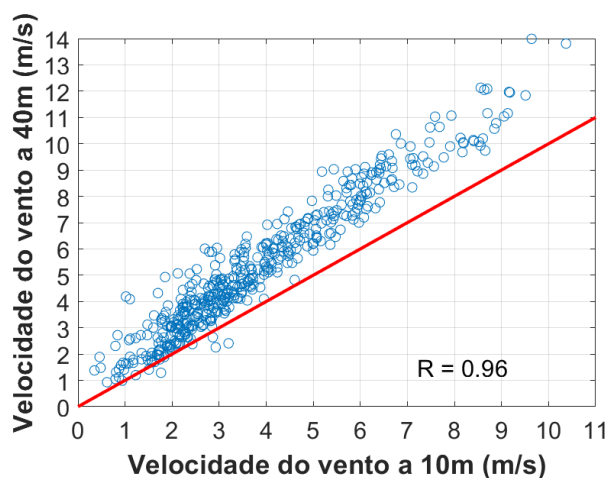
Figura 4.7 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m sem precipitação



Fonte: Autor.

A Figura 4.7 mostra a dispersão da velocidade do vento a 10 m em relação à velocidade do vento a 40 m quando não havia ocorrência de eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

Figura 4.8 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m com precipitação



Fonte: Autor.

A Figura 4.8 retrata essa mesma dispersão durante eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

Para analisar os efeitos que os eventos causam na DA, após seu término, foram considerados os eventos contínuos de precipitação e as quedas de DA acumulada. Foram separados os eventos em que não houve queda após precipitação (87%), com os eventos em que houve queda de DA (13%), como apresentado na Tabela 4.9.

Em seguida, os eventos foram classificados conforme a consistência, a duração e o acumulado, indicando-se quantos desses eventos não resultaram em queda na DA e quantos resultaram em queda após sua ocorrência, conforme demonstrado nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12. Constatou-se que, para a maioria dos eventos em cada subdivisão, a proporção daqueles que apresentaram queda na DA após sua ocorrência ficou abaixo de 40% dos eventos totais, conforme ilustrado na Figura 4.9.

Tabela 4.9 – Quantidade de eventos que houve queda de DA após precipitação

Não houve queda de DA	Houve queda de DA após precipitação	Total
187 (87%)	27(13%)	214 (100%)

Fonte: Autor.

Tabela 4.10 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação a CONE

CONE	Não houve queda de DA		Houve queda de DA após precipitação		Total
0,1	89	(96%)	4	(4%)	93
0,2	23	(92%)	2	(8%)	25
0,3	26	(84%)	5	(16%)	31
0,4	15	(75%)	5	(25%)	20
0,5	14	(82%)	3	(18%)	17
0,6	8	(80%)	2	(20%)	10
0,7	7	(64%)	4	(36%)	11
0,8	5	(83%)	1	(17%)	6
0,9	0	(0%)	1	(100%)	1
1	0		0		0

Fonte: Autor.

Tabela 4.11 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação a duração total

Duração da precipitação (min)	Não houve queda de DA		Houve queda de DA após precipitação		Total
10	97	(95%)	5	(5%)	102
20	35	(81%)	8	(19%)	43
30	16	(94%)	1	(6%)	17
40	8	(89%)	1	(11%)	9
50	9	(75%)	3	(25%)	12
60	4	(67%)	2	(33%)	6
70	7	(100%)	0	(0%)	7
80	3	(75%)	1	(25%)	4
90	2	(67%)	1	(33%)	3
Acima de 100	6	(55%)	5	(45%)	11

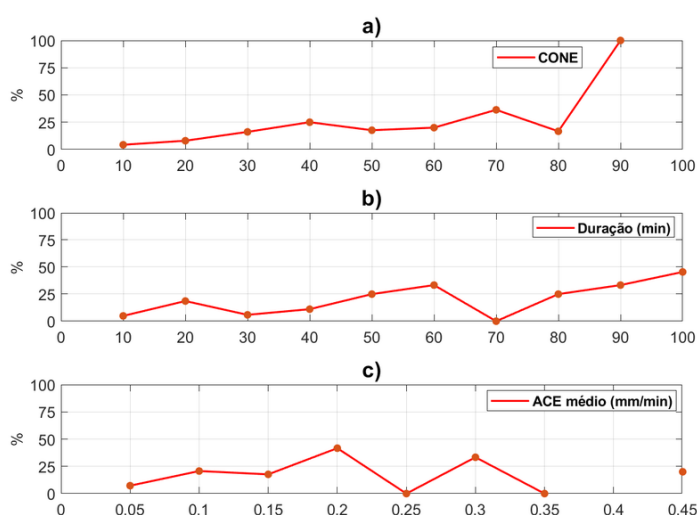
Fonte: Autor.

Tabela 4.12 – Quantidade de eventos com queda de DA em relação ao ACE médio

ACE médio (mm/min)	Não houve queda de DA		Houve queda de DA após precipitação		Total
$0 < x \leq 0,05$	128	(93%)	10	(7%)	138
$0,05 < x \leq 0,10$	23	(79%)	6	(21%)	29
$0,10 < x \leq 0,15$	14	(82%)	3	(18%)	17
$0,15 < x \leq 0,20$	7	(58%)	5	(42%)	12
$0,20 < x \leq 0,25$	6	(100%)	0	(0%)	6
$0,25 < x \leq 0,30$	4	(67%)	2	(33%)	6
$0,30 < x \leq 0,35$	1	(100%)	0	(0%)	1
$0,35 < x \leq 0,40$	0	(0%)	0	(0%)	0
$0,40 < x$	4	(80%)	1	(20%)	5

Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Quantidade de ocorrências de eventos com quedas de DA posterior à precipitação



Fonte: Autor.

A figura “a” exibe as ocorrências de queda de DA após a precipitação ocorrer em função da CONE. A figura “b” retrata as ocorrências de queda de DA após a precipitação ocorrer em função da duração da precipitação. A figura “c” exibe as ocorrências de queda de DA após a precipitação ocorrer em função do ACE médio.

Foi aplicada a correlação de Pearson entre os vários parâmetros para verificar a existência de comportamento dependente entre eles. Os parâmetros de precipitação mostraram uma correlação baixa com os parâmetros de queda de DA, com exceção da duração do evento com a duração de queda de DA que apresentou uma correlação de 0,734, como mostrado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Correlação entre os parâmetros de evento de precipitação com os de queda de DA

	Duração total da precipitação	Duração efetiva da precipitação	ACE	CONE
Tempo após a precipitação	-0,068	-0,150	-0,182	-0,211
Duração da Queda DA	0,734	0,847	0,641	0,309
DA média	-0,078	-0,179	-0,172	-0,526

Fonte: Autor.

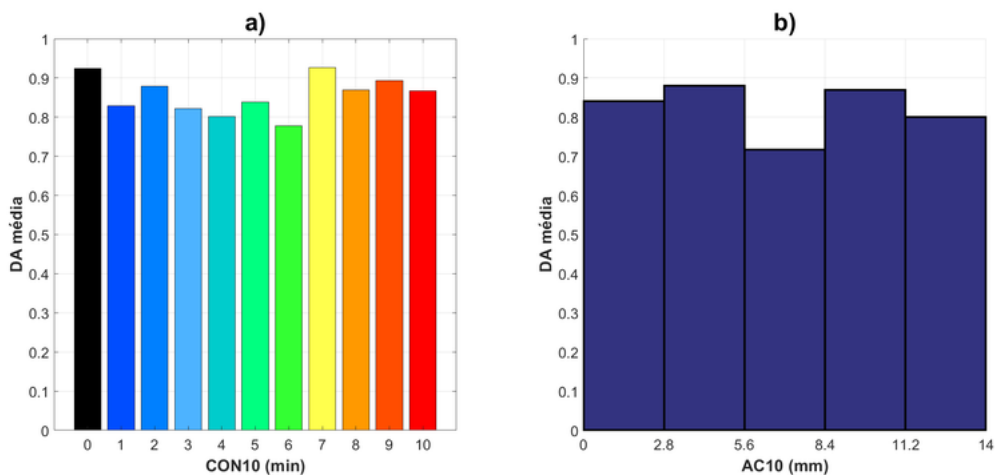
Com base nos resultados obtidos na análise de desempenho do LIDAR sob eventos de precipitação, pode-se concluir que seu desempenho não foi comprometido durante essas condições climáticas. Tanto o alcance quanto a precisão do equipamento permaneceram consistentes, durante a precipitação. Além disso, as quedas observadas após os eventos de precipitação não foram significativas o suficiente (Tabela 5.9) para sugerir uma influência da precipitação. Uma possível explicação para o alto rendimento do equipamento deve-se a sua localização próxima ao litoral, onde a presença de aerossóis marinhos é abundante, proporcionando alvos consistentes para as medições na maior parte do tempo. Mesmo após um evento de chuva, a quantidade de aerossóis se recompõe rapidamente de forma a não afetar significativamente a operação do LIDAR.

4.2.2 LIDAR distante do litoral

No caso do LIDAR distante do litoral foram observados comportamentos bastante diferentes de quando estava próximo ao litoral, com variações de DA antes, durante e depois de precipitações, inclusive em períodos sem eventos de precipitações próximos, em função condições que serão detalhadas a seguir.

Com base na análise da Figura 4.10, Tabela 4.14 e Tabela 4.15, em que são apresentadas as médias de DA para os eventos, em função de sua CON10 e de seu AC10, observa-se que há uma influência da precipitação na média de DA. Ainda que as médias de DA com precipitação sejam menores que a média sem precipitação, não foi possível estabelecer uma correlação desta queda com os diferentes níveis de CON10 ou AC10.

Figura 4.10 – DA média em relação à CON10 ao AC10



Fonte: Autor.

A figura “a” exibe a DA média para cada valor de CON10 variando de 0 a 10 min. A Figura “b” retrata a DA média para intervalos de AC10 entre 0 a 14 mm, divididos em 5 subintervalos de mesmo tamanho.

Tabela 4.14 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação à CON10

CON10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de eventos	11385	114	54	48	32	29	22	15	13	14	27
DA média	0,924	0,829	0,879	0,822	0,802	0,838	0,777	0,927	0,869	0,893	0,867
Desvio padrão	0,207	0,257	0,205	0,300	0,299	0,270	0,312	0,143	0,247	0,223	0,159
Coeficiente de variação	22%	31%	23%	36%	37%	32%	40%	15%	28%	25%	18%

Fonte: Autor.

Tabela 4.15 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação de DA em relação ao AC10

AC10	0 a 2,8	2,8 a 5,6	5,6 a 8,4	8,4 a 11,2	11,2 a 14
Quantidade de eventos	330	25	6	5	2
DA média	0,840	0,880	0,717	0,870	0,800
Desvio padrão	0,254	0,231	0,317	0,291	0,283
Coeficiente de variação	30%	26%	44%	33%	35%

Fonte: Autor.

A representatividade das medições de velocidade do vento do LIDAR durante eventos de precipitação foi avaliada para determinar se as observações eram consistentes ou se a qualidade dos dados era afetada pela chuva.

Visto que a instalação de um anemômetro a uma altura comparável (40 m) não era viável, a seguinte abordagem foi adotada:

O LIDAR foi instalado em uma área plana e livre de obstáculos.

Assumiu-se uma correlação entre o alcance mais baixo do LIDAR (40 m) e um anemômetro sônico instalado a 10 m em uma torre micrometeorológica próxima.

A similaridade das correlações em condições com e sem precipitação foi utilizada como evidência de que a precipitação não degradava a qualidade dos dados.

Esta análise envolveu a comparação da velocidade do vento medida pelo anemômetro a 10 m com a observada pelo LIDAR a 40 m, considerando dias com e sem precipitação. A Tabela 4.16 apresenta o número de eventos analisados, e as Figuras 4.11 e 4.12 ilustram a distribuição desses eventos juntamente com a Correlação de Pearson.

A análise revelou que não houve redução significativa na correlação entre eventos sem precipitação ($R = 0,90$) e eventos com precipitação ($R = 0,93$), conforme ilustrado nas Figuras 4.11 e 4.12.

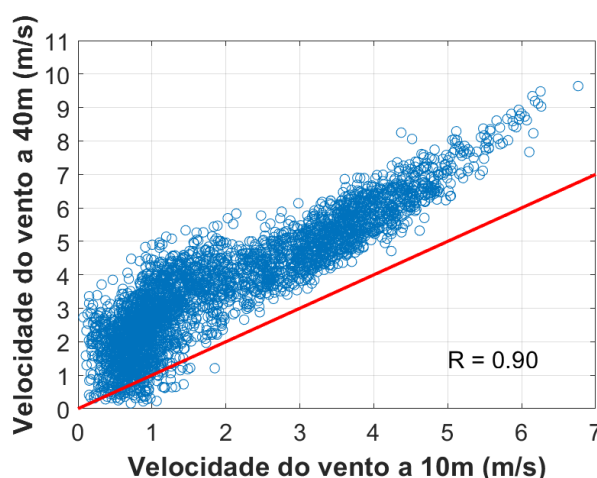
Adicionalmente, a análise do viés (bias) revelou valores de 1,65 para eventos sem precipitação e 1,31 para eventos com precipitação, refletindo a diferença esperada nas velocidades médias do vento entre 10 e 40 m. Esses achados apoiam a conclusão de que as medições do LIDAR permanecem confiáveis e representativas sob tais condições.

Tabela 4.16 – Quantidade de observações coletados para cada situação

Observações sem precipitação	3378
Observações com precipitação	221

Fonte: Autor.

Figura 4.11 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m sem precipitação

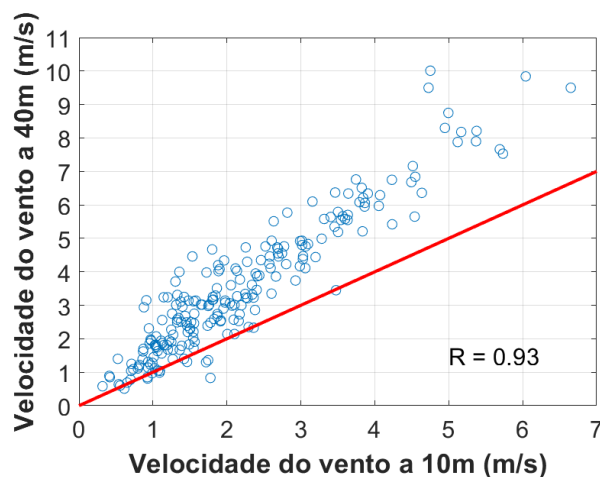


Fonte: Autor.

A Figura 4.11 mostra a dispersão da velocidade do vento a 10 m em relação à

velocidade do vento a 30 m quando não havia ocorrência de eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

Figura 4.12 – Dispersão da velocidade do vento a 10 m com a velocidade do vento a 40 m com precipitação



Fonte: Autor.

A Figura 4.12 retrata essa mesma dispersão, porém durante eventos de precipitação. A linha vermelha indica a igualdade das velocidades do anemômetro com o perfilador.

A análise das quedas de DA após as precipitações não foi realizada, devido à raridade de tais episódios nesta localização durante o período de estudo.

Em geral a DA do LIDAR distante do litoral em comparação com próximo ao litoral, se mostrou mais variável, tanto em dias chuvosos quanto em dias limpos. Como mostra a Tabela 4.17, que contém a DA média para os dias em que houve precipitação, para os dias em que não houve precipitação e para os dias em que não houve precipitação e mesmo assim houve queda de DA.

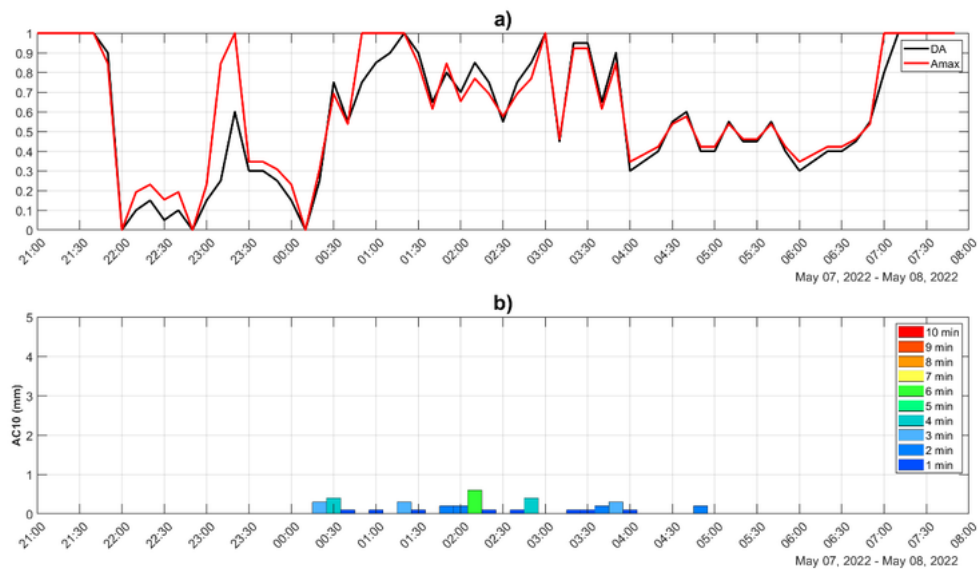
Tabela 4.17 – DA média nos dias em que houve precipitação, não houve precipitação e para os dias em que não houve precipitação e houve queda de DA

		Houve precipitação	Não houve precipitação	Queda de DA sem precipitação	Total
Próximo ao litoral	Quantidade de dias	86 (32,21%)	181 (67,79%)	15 (5,62%)	267 (100,00%)
	Média	0,997	0,999	0,982	0,998
	Desvio Padrão	0,031	0,024	0,081	0,026
Distante do litoral	Quantidade de dias	37 (49,33%)	38 (50,67%)	18 (24,00%)	75 (100,00%)
	Média	0,856	0,981	0,961	0,918
	Desvio Padrão	0,273	0,092	0,128	0,214

Fonte: Autor.

A Figura 4.13 mostra o comportamento da DA do LIDAR durante um período em que ocorreram vários eventos de precipitação. A DA já vinha em queda antes das ocorrências de precipitação, o que fez questionar se as precipitações eram as responsáveis principais por essas quedas.

Figura 4.13 – Alcance do LIDAR distante do litoral durante eventos de precipitação



Fonte: Autor.

A figura “a” exibe Amax (linha vermelho) e DA (linha preta) do equipamento em 7 de maio de 2022, iniciando às 01:30h e finalizando às 14:30h. NA figura “b” o comprimento das barras representa os valores de AC10 e a cor de cada barra representa os valores de CON10.

Na tentativa de encontrar outra variável que influenciasse no comportamento da DA do LIDAR, foram analisadas a direção do vento e a nebulosidade atmosférica como fatores que poderiam influenciar na DA do equipamento além da precipitação.

Em relação à direção do vento levantou-se a hipótese que ventos que não tivessem influência marinha poderiam transportar menos aerossóis ou os aerossóis transportados poderiam ser menos eficientes como alvos para o LIDAR, causando diminuição de DA;

Já em relação à nebulosidade levantou-se hipótese de que a nebulosidade, que influi na variação da temperatura do ar, poderia interferir no fluxo turbulento, diminuindo a quantidade de aerossóis em suspensão e, conseqüentemente, afetando a DA.

4.3 Análise da direção horizontal do vento

Para analisar a influência da direção do vento na DA do equipamento, as direções do vento foram agrupadas em quadrantes com os seguintes intervalos:

- 1° quadrante: igual a 0° até menor que 90°;
- 2° quadrante: igual a 90° até menor que 180°;
- 3° quadrante: igual a 180° até menor que 270°;
- 4° quadrante: igual a 270° até menor que 360°.

Para determinar a direção do vento, foi utilizada a altura mais elevada em que houve observação do vento, pois é geralmente nessas alturas em que se inicia a perda de alcance.

Na Tabela 4.18, é mostrada a DA média para cada quadrante de direção do vento tanto para o LIDAR próximo ao litoral quanto para o LIDAR distante do litoral.

Observando a Tabela 4.18, pode-se concluir que, quando o LIDAR estava próximo ao litoral, as observações de direção do vento foram predominantemente no 1° quadrante, com 89,63% dos perfis de vento observados, representando a maior parcela dos ventos oriundos do mar. A média de DA é alta em todos os quadrantes, variando de 0,94 a 0,99, sugerindo uma boa DA independente da direção do vento.

Para o LIDAR distante do litoral, ainda há uma predominância dos ventos do 1° quadrante (69,74%), mas a distribuição se expande um pouco para o 2° quadrante (25,86%). A quantidade de ventos nos 3° e 4° quadrantes aumentou em relação ao LIDAR próximo ao litoral, indicando uma maior variabilidade na direção dos ventos quando mais distante do litoral.

A média de DA mostrou-se alta nos 1° e 2° quadrantes (0,95) e (0,89) respectivamente, mas houve uma queda acentuada nos 3° e 4° quadrantes (0,52) e (0,61), sugerindo que ventos de influência terrestre têm um grande impacto no alcance do equipamento.

Tabela 4.18 – DA média para cada quadrante de direção do vento

Posição relativa ao litoral	Quadrantes	1°	2°	3°	4°	Total
Próximo	N° de eventos	34237 (89,63%)	3483 (9,12%)	227 (0,59%)	253 (0,66%)	38200 (100%)
	DA média	0,999	0,994	0,942	0,986	-
	Desvio padrão	0,020	0,043	0,138	0,075	-
Distante	N° de eventos	7395 (69,74%)	2742 (25,86%)	318 (3,00%)	148 (1,40%)	10603 (100%)
	DA média	0,950	0,892	0,521	0,610	-
	Desvio padrão	0,172	0,223	0,362	0,327	-

Fonte: Autor.

Para dar suporte a tal conclusão, foi estudado um ponto próximo à costa (P3). Foi escolhido o período em que ocorreu o evento chuvoso mais intenso de todo o experimento (9,78 mm/d). O período chuvoso resulta em uma diminuição da influência dos ventos alísios e da intensidade da brisa marítima.

Essas duas condições levam a ventos mais fracos e períodos mais longos de direção do vento proveniente do continente. Consequentemente, isso resulta em menor influência de aerossóis marítimos em P3, tornando-o similar a pontos mais distantes da costa.

Ao analisar este ponto, foram encontrados 18 eventos de chuva. Desses, 10 eventos resultaram em quedas na DA. Dentro desses 10 eventos, observou-se que:

- Sete eventos tinham velocidades abaixo de 5 m/s.
- Três eventos tinham velocidades entre 5 m/s e 7 m/s.
- Sete eventos tinham direção do vento proveniente do mar.
- Três eventos tinham direção do vento proveniente do continente.
- Houve, ainda, oito eventos de precipitação sem quedas na DA. Neles todos, a direção do vento era proveniente do mar e a velocidade estava acima de 5 m/s.

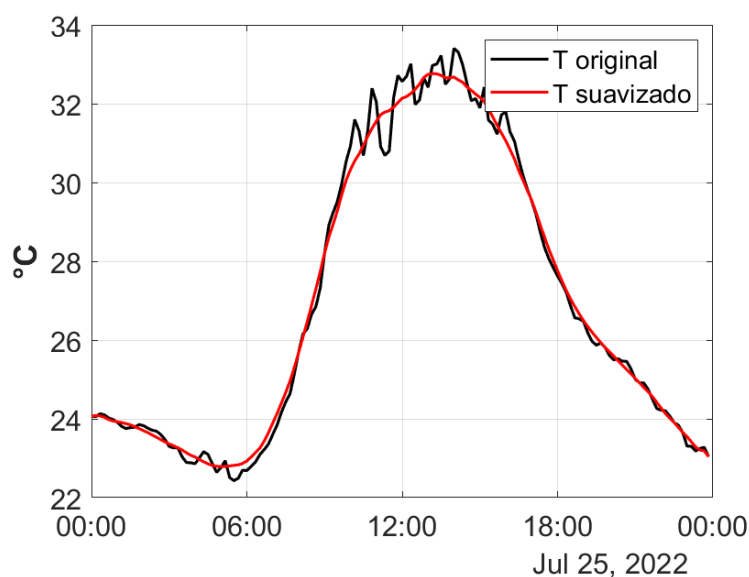
Essa análise reforça o entendimento de que ventos de baixa intensidade ou ventos provenientes do continente retardam o retorno dos aerossóis responsáveis pela recuperação do desempenho da DA.

4.4 Análise de Nebulosidade

Para a análise de nebulosidade, a abordagem adotada foi considerar as variações diárias de temperatura como indicadores de nebulosidade e, dessa forma, compará-las com a média diária de DA.

Para obter essa variação de temperatura diária, foi utilizada uma curva de temperatura diária modelo para comparação com outras curvas de temperatura observadas. A curva de temperatura diária modelo escolhida foi a do dia 25 de julho de 2022, conforme mostrado na Figura 4.14. Esta curva foi suavizada utilizando a técnica estatística de média móvel, na qual cada ponto da série de dados é substituído pela média dos pontos vizinhos.

Figura 4.14 – Curva de temperatura diária modelo



Fonte: Autor.

A figura exibe a curva de temperatura do dia 25 de julho de 2022 (linha preta) e a curva de temperatura suavizada (linha vermelha) desse mesmo dia.

Utilizando essa curva modelo, foi calculada a média do módulo das diferenças entre a curva modelo de temperatura e as curvas de temperatura observadas diariamente, formando assim o indicador de nebulosidade. Para fins de comparação, foi utilizada a Correlação de Pearson entre este indicador de nebulosidade e a média diária da DA. A correlação obtida foi de $R = -0,3531$. Embora o coeficiente seja negativo, seu valor absoluto é baixo, o que sugere uma fraca influência entre as duas variáveis. Isso significa que, no âmbito das medições diárias, o indicador de nebulosidade não exerce influência significativa sobre a DA do equipamento.

4.5 Síntese dos Resultados

Observou-se que o SODAR, operando em um único ponto, demonstrou uma rápida recuperação da disponibilidade de alcance (DA) após o término da precipitação. A CON10 e o AC10 apresentaram um impacto significativo na DA do SODAR (DA média menor que 50% a partir de 7 min de consistência), mas as medições em condições de precipitação continuaram sendo razoavelmente representativas (correlações altas de velocidade de vento tanto para dias sem chuva (0,93) tanto para períodos com chuva (0,83)). Por outro lado, o LIDAR, operando tanto próximo quanto distante do litoral, apresentou variações de comportamento. Próximo ao litoral, a precipitação (CON10 e AC10) não influenciou instantaneamente na DA (DA média de 0,97 para 10 min CON10), e as medições mantiveram-se representativas (correlações altas de velocidade de vento tanto para dias sem chuva (0,96)

como para períodos com chuva (0,96)). As quedas na DA após eventos de precipitação não foram significativas o suficiente para sugerir uma influência substancial (13% do total dos eventos de precipitação). Já distante do litoral, o LIDAR mostrou variações de DA antes, durante e após a precipitação, inclusive em períodos sem precipitação próxima. Nessas condições, a DA não diminuiu proporcionalmente com o aumento da CON10 ou do AC10, e as medições em condições de precipitação permaneceram representativas (correlações altas de velocidade de vento tanto para dias sem chuva (0,90) tanto para períodos com chuva (0,93)). Ventos de influência terrestre tiveram um grande impacto no alcance do equipamento (DA média próxima de 50%), enquanto o indicador de nebulosidade não afetou de forma significativa a DA diária, tendo em vista o coeficiente de correlação $R = -0,35$.

5 CONCLUSÃO

A metodologia proposta nesta pesquisa destaca-se pela introdução da métrica de Disponibilidade de Alturas (DA), um indicador desenvolvido especificamente para preencher uma lacuna nas avaliações convencionais de sensores remotos. Diferente da disponibilidade temporal comum, que se limita a indicar se o equipamento está operando, a DA permite mensurar a eficácia vertical do perfilador. Esse avanço metodológico torna-se crucial para o setor eólico ao fornecer uma visão clara de como eventos meteorológicos, especialmente a chuva, comprometem as leituras em altitudes elevadas, onde se situam as pás das turbinas modernas, garantindo maior confiabilidade na estimativa do recurso eólico disponível.

Complementarmente, a estratégia de caracterizar a chuva por meio da consistência (CON10) e dos acumulados (AC10) possibilitou uma compreensão detalhada sobre a sensibilidade diferenciada das tecnologias LIDAR e SODAR. Essa análise revelou que a consistência da chuva é, muitas vezes, mais determinante para a perda de dados do que o volume total precipitado, permitindo identificar os limites operacionais exatos em que cada tecnologia deixa de ser uma fonte confiável de informação.

A robustez dessa metodologia foi validada ao aplicar tais métricas em diferentes contextos geográficos, comparando áreas litorâneas e continentais. Enquanto o SODAR operou em um ponto fixo, o LIDAR foi deslocado por diversas localidades, revelando que o desempenho do laser é superior e mais resiliente próximo ao litoral, mesmo sob chuva leve ou intensa. Por outro lado, a pesquisa levanta a hipótese de que a proximidade marinha pode ter prejudicado o SODAR, uma vez que a brisa do mar suaviza a variação térmica — fenômeno essencial para o retroespalhamento dos pulsos sonoros. Portanto, os resultados reforçam a necessidade de considerar a localização específica e a dinâmica atmosférica local ao selecionar essas tecnologias.

Diante da complexidade das interações entre a atmosfera e o sensoriamento remoto, esta pesquisa estabelece uma base técnica sólida sobre o litoral maranhense, mas também abre caminhos para investigações complementares. Para refinar a viabilidade técnica e econômica desses sistemas, sugerem-se estudos futuros focados em:

- **Análise de Custo-Benefício Localizada:** Comparar os custos de instalação de torres anemométricas de 150 metros em relação à operação de LIDAR/SODAR no Maranhão, ponderando logística e manutenção em ambientes salinos.
- **Impacto Financeiro da Perda de Dados:** Quantificar como a queda na DA durante chuvas afeta a incerteza do financiamento bancário para projetos eólicos.
- **Modelagem de Correção de Dados:** Desenvolver algoritmos de inteligência artificial capazes de “corrigir” quedas de disponibilidade em tempo real, utilizando a direção do vento e a intensidade da chuva como variáveis preditivas.

5.1 Contribuições e produção científica

Este trabalho não apenas cumpriu seus objetivos acadêmicos, mas também gerou produção intelectual de impacto para o setor eólico. Os achados referentes ao desempenho dos sensores no Maranhão resultaram na seguinte publicação:

- **Artigo em Periódico:** CARVALHO, A. J.; ALBUQUERQUE NETO, F. L.; OLIVEIRA, D. Q. **Analyzing the performance of vertical wind profilers in rain events.** *Wind Energy Science*, v. 10, n. 5, p. 971–986, 2025.

REFERÊNCIAS

- ASSIREU, A. T. et al. EOSOLAR Project: Assessment of Wind Resources of a Coastal Equatorial Region of Brazil—Overview and Preliminary Results. **Energies**, v. 15, n. 2319, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15072319>.
- BUZDUGAN, L.; BUGEAC, O. P.; STEFAN, S. A comparison of low-level wind profiles from Mode-S EHS data with ground-based remote sensing data. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, p. 1455–1468, 2021. DOI: 10.1007/s00703-021-00820-2.
- BUZDUGAN, L.; STEFAN, S. A comparative study of SODAR, LIDAR wind measurements and aircraft derived wind observations. **Romanian Journal of Physics**, v. 65, n. 810, 2020.
- CHAURASIYA, P. K.; AHMED, S.; WARUDKAR, V. Wind characteristics observation using Doppler-SODAR for wind energy applications. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, n. 4, p. 495-505, 2017. ISSN 2405-6537.
- DUBOV, D.; APRAHAMIAN, B.; APRAHAMIAN, M. Comparison between conventional wind measurement systems and SODAR systems for remote sensing including examination of real wind data. *In: Proc. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2017. p. 106–109. DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955411.
- DUBOV, D.; APRAHAMIAN, B.; APRAHAMIAN, M. Comparison of Wind Data Measurement Results of LIDAR Device and Calibrated Cup Anemometers Mounted on a Met Mast. *In: 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, 2018. DOI: 10.1109/SIELA.2018.8447141.
- FINN, A. et al. A comparison of vertical atmospheric wind profiles obtained from monostatic SODAR and unmanned aerial vehicle–based acoustic tomography. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 34, p. 2311–2328, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0070.1>.
- FREHLICH, R.; MEILLIER, Y.; JENSEN, M. L. Measurements of boundary layer profiles with in situ sensors and Doppler LIDAR. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 8, p. 1328-1340, ago. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA963.1>.
- GAO, H. et al. High-Order Taylor Expansion for Wind Field Retrieval Based on Ground-Based Scanning LIDAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 60, p. 1-14, 2022. Art no. 4107914. doi: 10.1109/TGRS.2022.3170990.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **GWEC Global Wind Report 2024**, 2024. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>. Acesso em: 5 ago. 2024.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas de comunicação**. Tradução de Tales Argolo Jesus. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- HE, J. Y. et al. Characterizing coastal wind energy resources based on SODAR and microwave radiometer observations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 163,

112498, 2022. ISSN 1364-0321.

HOMER ENERGY. **Wind resource variation with height**. Disponível em: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/wind_resource_variation_with_height.html. Acesso em: 29 dez. 2025.

KELLEY, N. D. et al. **Comparing Pulsed Doppler LIDAR with SODAR and Direct Measurements for Wind Assessment**; Technical Report. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Lab. (NREL), 2007.

KHAN, K. S.; TARIQ, M. Wind resource assessment using SODAR and meteorological mast – A case study of Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, part 2, p. 2443-2449, 2018.

KIM, D. et al. A comparison of ground-based LIDAR and met mast wind measurements for wind resource assessment over various terrain conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 158, p. 109-121, 2015. ISSN 0167-6105.

KUMER, V. M.; REUDER, J.; FUREVIK, B. R. A Comparison of LIDAR and Radio-sonde Wind Measurements. **Energy Procedia**, v. 53, p. 214–220, 2014.

LANDBERG, L. **Meteorology for wind energy: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.

LANG, S.; MCKEOGH, E. LIDAR and SODAR measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purposes. **Remote Sensing**, v. 3, p. 1871–1901, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs3091871>.

LIU, Z. et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind LIDARs. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, p. 2522, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11212522>.

MARTINS, A. V. C. et al. Influence of Vertical Wind Shear on the Annual Energy Production of a Coastal Region in Northeastern Brazil. *In: 2023 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, Brasília, Brazil, 2023, p. 1-7. doi: 10.1109/WCNPS60622.2023.10344372.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 1, mar. 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Portaria nº 102, de 22 de março de 2016*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias/2016/portaria-n-102-2016.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Trudy Geofizicheskogo Instituta Akademii Nauk SSSR**, v. 24, p. 163–187, 1954.

MONTANA DEQ. **Wind Energy Atlas** – Chapter 5. Disponível em: <https://deq.mt.gov/Portals/112/Energy/EnergizeMT/EnergySites/WindAtlas/Chapter5.PDF>. Acesso em: 29 dez. 2025.

PEARSON, K. **Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

Series A, v. 187, p. 253-318, 1896.

PIMENTA, F. M. et al. Characterization of Wind Resources of the East Coast of Maranhão, Brazil. **Energies**, v. 16, n. 5555, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16145555>.

QUARTAROLI, C. F.; VICENTE, L. E.; ARAUJO, L. S. de. Sensoriamento remoto. In: TÔSTO, S. G. et al. (ed.). **Geotecnologias e geoinformação**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 61-79. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/988055>.

SINHA, S. et al. Doppler Profile Tracing Using MPCF on MU Radar and SODAR: Performance Analysis. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 15, p. 508–511, 2018.

SKOLNIK, M. I. **Introduction to radar systems**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

TORRES JUNIOR, A. R. et al. Performance Evaluation of LIDAR and SODAR Wind Profilers on the Brazilian Equatorial Margin. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14654, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142114654>.

UL SOLUTIONS. **Remote sensing for onshore and offshore wind speed measurement**. Northbrook, IL: UL Solutions, [2025]. Disponível em: <https://www.ul.com/services/remote-sensing-onshore-and-offshore-wind-speed-measurement>. Acesso em: 29 dez. 2025.

UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS. **LIDAR | Wind Energy Center**. Amherst, [2025]. Disponível em: <https://www.umass.edu/windenergy/research/topics/tools/hardware/LIDAR/index.html>. Acesso em: 29 dez. 2025.

WEI, T. et al. Retrieving aerosol backscatter coefficient using coherent Doppler wind LIDAR. **Optics Express**, v. 33, n. 5, p. 6832-6849, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/OE.549214>.

WIND PROFILE power law. **ChemEurope.com**. Disponível em: https://www.chemeuropa.com/en/encyclopedia/Wind_profile_power_law.html. Acesso em: 29 dez. 2025.

WINDSYSTEMSMAG. **LIDAR vs. Met masts for wind-energy measurement**. Disponível em: <https://www.windsystemsmag.com/LIDAR-vs-met-masts-for-wind-energy-measurement/>. Acesso em: 29 dez. 2025.

WOLZ, K. et al. Comparing triple and single Doppler LIDAR wind measurements with sonic anemometer data based on a new filter strategy for virtual tower measurements. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, v. 13, p. 205–223, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gi-13-205-2024>.

ZHOU, Z.; BU, Z. Wind measurement comparison of Doppler LIDAR with wind cup and L band sounding radar. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, 2021. Preprint.