

## **ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE DADOS APLICADOS AO LEVANTAMENTO DE RECURSOS EÓLICOS**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)**

Carina Souza (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [carina.souza@fosjc.unesp.br](mailto:carina.souza@fosjc.unesp.br)

Enio B. Pereira (CCST/INPE)  
E-mail: [enio.pereira@inpe.br](mailto:enio.pereira@inpe.br)

Junho de 2017

## **Resumo**

O presente trabalho foi iniciado em agosto de 2016 visando a continuidade do projeto de Iniciação Científica elaborado no primeiro semestre desse mesmo ano e tem como objetivo avaliar os métodos de qualificação aplicados aos dados ambientais e espaciais destinados a quantificação do recurso eólico nacional. Com o intuito de viabilizar esse objetivo fez-se a revisão bibliográfica de metodologias de qualificação de dados, a análise de consistência de observações entre sensores anemométricos com princípios de medição distintos e a revisão dos algoritmos. A seguir foi realizada a avaliação de desempenho na detecção de falhas entre sensores anemométricos mecânicos e sônicos, identificando deficiências e propondo melhorias, assim como a aplicação de novos critérios. Realizou-se a identificação e análise das diferenças nos parâmetros de qualidade entre os diferentes sensores. A aplicabilidade dos critérios inicialmente sugeridos foi verificada e analisou-se a diferença entre a medição de dados em uma mesma estação meteorológica em um mesmo período de tempo de dois anemômetros com princípios de medição diferentes. E em sequência implementou-se os novos critérios de qualificação de dados eólicos para a estação da rede SONDA que se localiza na cidade de Petrolina, no estado de Pernambuco. O resultado final obtido foi o aumento na confiabilidade dos dados adquiridos e conseqüentemente na consistência das análises realizadas, já que além das caracterizações locais, estes dados também são utilizados na validação de modelos computacionais de levantamento do recurso eólico.

## **1.0 Introdução**

O consumo de energia mundial vem crescendo com o desenvolvimento de novas tecnologias e a preocupação com a poluição e degradação do meio ambiente cresce a mesma taxa. O estudo de novas formas de gerar energia, torna-se então necessário para que seja possível desenvolver-se tecnologicamente de modo sustentável. A energia eólica é a energia gerada através da passagem do vento, movimento horizontal do ar, paralelo a superfície do planeta, pela pá eólica que ao girar aciona a turbina que faz a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica, sendo assim menos poluente que o uso do petróleo e seus derivados, por exemplo.

A disposição do vento na superfície do planeta não é uniforme, podendo-se verificar que em uma mesma região há diferenças nas medidas realizadas a alturas diferentes. A explicação desse fato deve-se ao perfil logarítmico apresentado pela camada limite superficial de modo que o gradiente vertical da velocidade do vento é maior mais próximo à superfície, o que ocasiona turbulências. O topo da camada limite estabelece aproximadamente a altura em que o vento se torna geostrófico, ou seja, a altura em que o vento não sofre influência do atrito. O vento geostrófico é um modelo idealizado para facilitar a compreensão do comportamento do escoamento de ar em altos níveis (Martins, Guarnieri, & Pereira, 2008).

A temperatura e a pressão são variáveis meteorológicas que influenciam na direção e velocidade do vento, sendo a consequência da primeira o aquecimento diferencial da superfície terrestre e o ar atmosférico através da radiação solar, dando origem as diferenças de pressão. Os gradientes de pressão constituem a principal força motriz dos movimentos de ar, surgindo-se então o vento, o qual é controlado pela força de atrito e de Coriolis, sendo esta, a qual modifica a direção do vento (Martins, Guarnieri, & Pereira, 2008).

Ao tratar de energia eólica e conhecendo-se a complexidade do funcionamento do vento pode ser necessário a verificação do potencial energético de cada região para a geração dessa forma de energia mais 'limpa'. O anemômetro é um instrumento que mede a velocidade e direção do vento, entre outros dados, o que torna possível analisar os dados obtidos e calcular o potencial eólico da região, por exemplo. As medidas realizadas por esse instrumento podem conter erros, devido a diversos fatores tecnológicos (Ex.: atrito, limitações do princípio de medição, etc) e ao fator de erro humano na instalação ou programação do aparelho. A qualificação desses dados torna-se necessária antes da utilização dos dados, pois quanto maior o erro associado as medidas, menos exato será o resultado calculado pelo interessado.

Os desenvolvimentos de novas tecnologias afetam diretamente a qualificação dos dados devido a aplicação de diferentes princípios de medição em instrumentos que são utilizados para um mesmo fim. Ao analisar os dados deve-se então considerar os diferentes erros associados a cada um dos princípios e caso o intuito seja a comparação dos dados, torna-se necessário uma análise mais detalhada, incluindo a análise da diferença causada pelos diferentes princípios de medição.

Acredita-se que no futuro os anemômetros mecânicos serão substituídos pelos sônicos, devido a diversos fatores como a redução do custo de manutenção e a menor frequência de dados incorretos, portanto tornar-se imprescindível o estudo detalhado das diferenças entre os dois sensores e como isso afeta os dados medidos, para se conhecer a qualidade do conjunto obtido.

## **2.0 Materiais e Métodos**

Os materiais utilizados foram as referências bibliográficas, as quais incluem os manuais dos anemômetros mecânico e sônico, os programas de computação Matlab e Excel e os três meses de dados retirados dos anemômetros sônico e mecânico instalados pela Rede SONDA em Petrolina no ano de 2016.

O método utilizado foi revisão bibliográfica, aplicação da distribuição Weibull aos dados de velocidade do vento à 25 (vinte e cinco) metros e a 50 (cinquenta) metros de altura, o que implicou em calcular os parâmetros (fator de forma e fator de escala) de cada conjunto de dados para que fosse possível aplicar a função de distribuição de probabilidade e a análise dos dados qualificados com os parâmetros tradicionais e com o novo parâmetro para fins de comparação.

## **3.0 Desenvolvimento**

### 3.1 Anemômetro Sônico

O WindSonic é um anemômetro ultrassônico que mede direção e velocidade do vento, utilizando dois pares de transdutores orientados ortogonalmente para medir o vento horizontal, ou seja, ele mede o tempo que um pulso ultrassônico do som leva ao viajar do transdutor norte para o sul, e o compara com o tempo levado na viagem do transdutor sul para o norte. O equipamento também compara o tempo levado entre o transdutor oeste para o leste, e de leste para o oeste.

O equipamento foi feito de forma a minimizar o efeito da sombra do transdutor e a distorção de fluxo nas medidas realizadas. Ele não possui partes que se movem e que precisem ser trocadas periodicamente, o que minimiza os custos de manutenção de rotina e os erros associados a inércia das partes móveis.

O manual desse anemômetro especifica os limites de operação do equipamento (Tabela 1 e 2), os quais serão considerados na comparação dos dados, pois podem interferir na realização das medidas, como por exemplo o menor valor medido pelos diferentes equipamentos.

**Tabela 1: Especificações do Anemômetro Sônico – Velocidade do Vento**

| Velocidade do Vento |                        |                                      |               |                 |                               |
|---------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------------|
| Equipamento         | Faixa de leitura [m/s] | Velocidade mínima para leitura [m/s] | Precisão      | Resolução [m/s] | Temperatura de operação [° C] |
| WindSonic4          | 0 - 60                 | 0,01                                 | ±2% em 12 m/s | 0,01            | -35 a 70                      |

**Tabela 2: Especificações do Anemômetro Sônico – Direção do Vento**

| Direção do Vento |                      |                                      |                 |              |               |                               |
|------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| Equipamento      | Faixa de leitura [°] | Velocidade mínima para leitura [m/s] | Faixa morta [°] | Precisão [°] | Resolução [°] | Temperatura de operação [° C] |
| WindSonic4       | 0 - 359              | 0,05                                 | 0               | ±3           | 1             | -35 a 70                      |

### 3.2 Anemômetro Mecânico

O Wind Monitor-MA mede a velocidade e direção do vento horizontal. A rotação da hélice produz um sinal de onda senoidal de corrente alternada com frequência proporcional a velocidade do vento. Esse sinal de corrente alternada é induzido em uma bobina estacionária por seis polos magnéticos montados sobre o eixo da hélice. Três ciclos completos de ondas senoidais são produzidos por cada revolução da hélice.

O sensor de velocidade desse equipamento é formado por uma hélice de quatro pás helicoidais. Um transdutor produz o sinal de um pulso sem contatos elétricos ou anéis deslizantes. O sensor de direção do vento é uma ‘vane’ moldada e durável. O ângulo da ‘vane’ é medido por um potenciômetro de precisão instalado numa câmara selada. Com uma voltagem conhecida aplicada ao potenciômetro, a voltagem de saída é diretamente proporcional ao ângulo da ‘vane’.

O manual desse anemômetro fornece as informações que estão apresentadas nas tabelas de especificações (Tabela 3 e 4), nas quais observam-se diferenças quanto as tabelas do anemômetro sônico.

**Tabela 3: Especificações do Anemômetro Mecânico – Velocidade do Vento**

| Velocidade do Vento |                        |                                      |                        |                 |                               |
|---------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Equipamento         | Faixa de leitura [m/s] | Velocidade mínima para leitura [m/s] | Precisão               | Resolução [m/s] | Temperatura de operação [° C] |
| R.M. Young 05106    | 0 - 100                | 1,1                                  | ±0,3 m/s ou 1% leitura | 0,098           | -50 a 50                      |

**Tabela 4: Especificações do Anemômetro Mecânico – Direção do Vento**

| Direção do Vento |                      |                                      |                 |              |               |                               |
|------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| Equipamento      | Faixa de leitura [°] | Velocidade mínima para leitura [m/s] | Faixa morta [°] | Precisão [°] | Resolução [°] | Temperatura de operação [° C] |
| R.M. Young 05106 | 0 - 355              | 1,1                                  | 5               | ±3           | -             | -50 a 50                      |

### 3.3 Comparação Técnica entre o Anemômetro Sônico e Mecânico

#### 3.3.1 Velocidade do Vento

Ao analisar os manuais dos dois anemômetros, verificou-se diferenças entre os princípios de medição de cada instrumento, o que pode influenciar no resultado da medição.

O instrumento de medição que usa o princípio sônico possui uma faixa de medição mais restrita do que o mecânico, medindo entre 0 e 60 m/s, mas a rede SONDA só considera a medida como correta se ela estiver entre 0 e 25 m/s, pois são raras as medidas acima desse limiar, ou seja, essa diferença entre eles não deve influenciar na medida realizada.

A velocidade mínima para leitura, no entanto, é um fator que modifica o resultado final do conjunto de dados e o anemômetro sônico mede no mínimo 0,01 m/s, enquanto o mecânico mede no mínimo 1,1 m/s, o que explica a diferença entre a quantidade de medidas iguais a zero encontrada nos conjuntos de dados estudados nesse projeto. O instrumento mecânico mediu para a velocidade do vento, 11 zeros à 25 metros e 28 zeros para a altura de 50 metros, enquanto o sônico não mediu nenhum zero, mas registrou 17 ‘NaN’ (Not a Number) à 25 metros e à 50 metros não foi registrado nenhum zero ou ‘NaN’. Identifica-se que a altura de 25 metros ocorreu algum problema com o equipamento durante o período de tempo em que foi registrado os códigos ‘NaN’.

As precisões dos equipamentos são de ± 0,3 m/s ou 1% da leitura e de ± 2% em 12 m/s, o primeiro valor representa o anemômetro mecânico e o segundo valor o sônico. Comparando os dois valores para a velocidade de 12 m/s, é possível verificar que o sônico

é mais preciso que o mecânico, obtendo-se um valor de 0,24 m/s de precisão em comparação com o de 0,3 m/s do R.M. Young 05106.

As resoluções dos dois instrumentos são bem diferentes, sendo o sônico o que possui maior resolução, porém como a precisão desse sensor não condiz com a resolução, esse fator não interfere de forma significativa no conjunto de dados. A temperatura de operação do mecânico possui um limiar inferior mais baixo de -50° C e o sônico possui um limiar superior mais alto de 70 ° C, mas não são diferenças significativas, pois no Brasil não há registros dessas temperaturas.

### 3.3.2 Direção do Vento

A faixa de leitura do anemômetro sônico é mais abrangente que a do mecânico, sendo de 0 a 359 graus e de 0 a 355 graus, respectivamente. Considerando que o mecânico possui uma faixa morta de cinco graus e o sônico não possui faixa morta, pode-se inferir que o Windsonic possui uma maior confiabilidade para os valores entre 356 e 359 graus.

A velocidade mínima para leitura do R.M. Young 05106 é de 1,1 m/s e do Windsonic é de 0,05 m/s, essa diferença é importante na realização das medidas, pois o equipamento sônico consegue registrar as direções do vento antes do mecânico. Então o banco de dados do Windsonic para a direção do vento é mais completo, o que permite uma aproximação maior da realidade das condições locais.

A precisão de ambos os equipamentos é de  $\pm 3$  graus, portanto não há diferenças geradas por esse fator. Quanto a resolução, a do sônico é de um grau e a do mecânico não foi especificada, não permitindo atribuir a esse fator as diferenças encontradas nas medidas registradas pelos equipamentos. A temperatura de operação para a direção do vento é a mesma do fator velocidade do vento para ambos os anemômetros.

### 3.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma distribuição de valores extremos, a qual representa de forma mais adequada o perfil do vento. Ela requer que sejam calculados os fatores de forma e de escala antes de aplicar a função de distribuição de probabilidade no conjunto de dados, para isso utilizou-se a função `wblfit` do matlab. Ao filtrar os dados que seriam usados notou-se que devido a função distribuição de probabilidade conforme é observado na Equação 1, sendo  $c$  e  $k$  os parâmetros (fator de escala e de forma, respectivamente) e  $\bar{v}$  o valor médio da velocidade do vento, que o valor de  $\bar{v}$  tem que ser diferente de zero, pois não é matematicamente aceito a divisão por zero. Dessa forma, os valores obtidos iguais a zero para a velocidade do vento não são utilizados nessa distribuição.

$$f(\bar{v} | c, k) = \frac{k}{c^k} * \frac{\bar{v}^k}{\bar{v}} * e^{-\left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Ao aplicar a distribuição de Weibull aos dados coletados na estação de Petrolina, pôde-se observar que há uma diferença visível entre as curvas dos anemômetros (Gráfico 1). O fator de escala calculado à 25 metros para o sônico foi de 3.7335 e para o mecânico foi de 3.5469, já o fator de forma a mesma altura para o sônico foi 2.6892 e para o mecânico foi 2.5334. As causas dessa diferença são os diferentes princípios de medição utilizados nos instrumentos, pois o intervalo temporal, o período, o nível e a região do

conjunto de dados são os mesmos. Portanto comprova-se que é necessário um estudo mais detalhado da influência desse deslocamento das curvas no processo de qualificação dos dados.

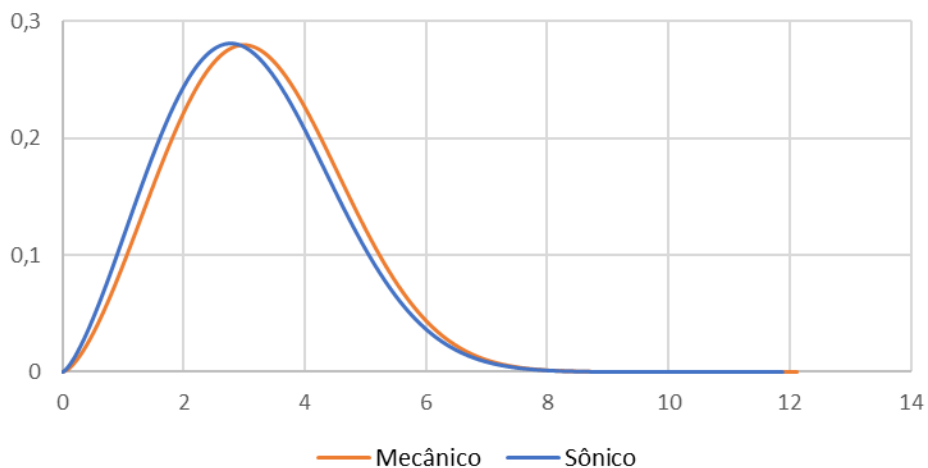


Gráfico 1: Distribuição de Weibull para o sensor de 25 metros da estação de Petrolina

O deslocamento encontrado nas curvas de probabilidade também pode ser verificado quando os dados brutos são sobrepostos. A representação dessa diferença torna-se mais grosseira, como verifica-se no Gráfico 2, no entanto, os critérios de qualificação são aplicados aos dados brutos e o cálculo de novos critérios serão realizados em cima desse gráfico.

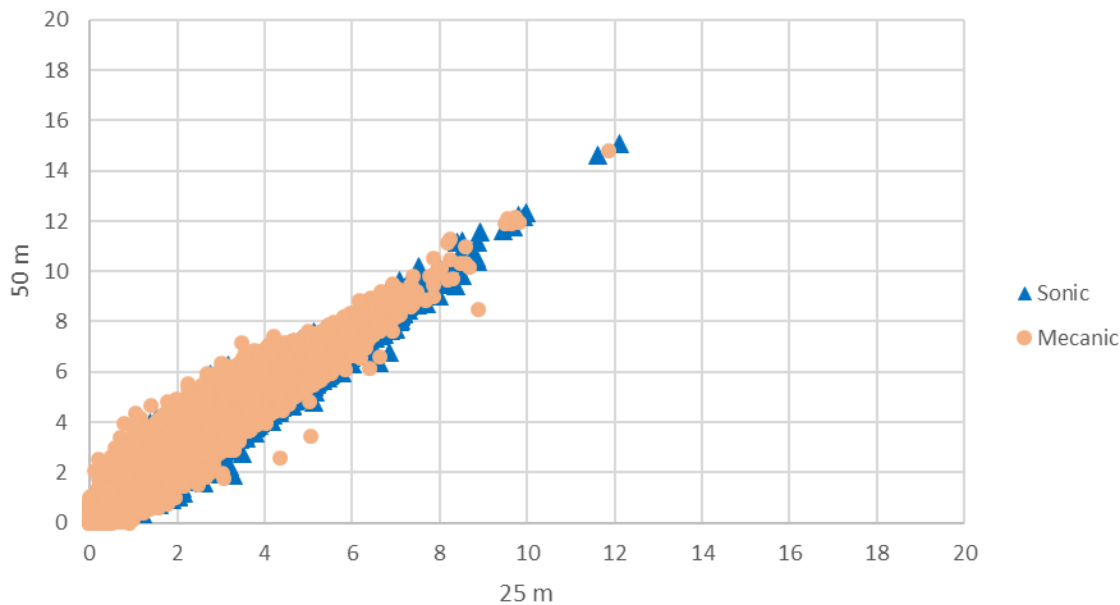


Gráfico 2: Dados brutos da estação de Petrolina

O intuito inicial desse estudo era analisar três regiões diferentes que representassem os diferentes climas do Brasil, no entanto quando foi calculada a distribuição de Weibull para as estações de Brasília e São Martinho da Serra para realizar a comparação entre as medidas dos anemômetros sônico e mecânico, encontrou-se duas curvas muito distintas uma da outra, o que pode ser verificado nos Gráficos 3 e 4.

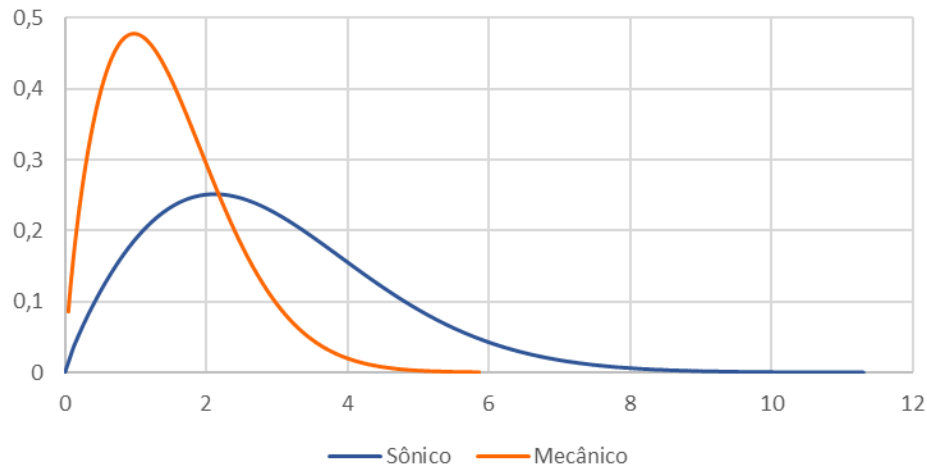


Gráfico 3: Distribuição de Weibull para o sensor de 25 metros da estação de Brasília

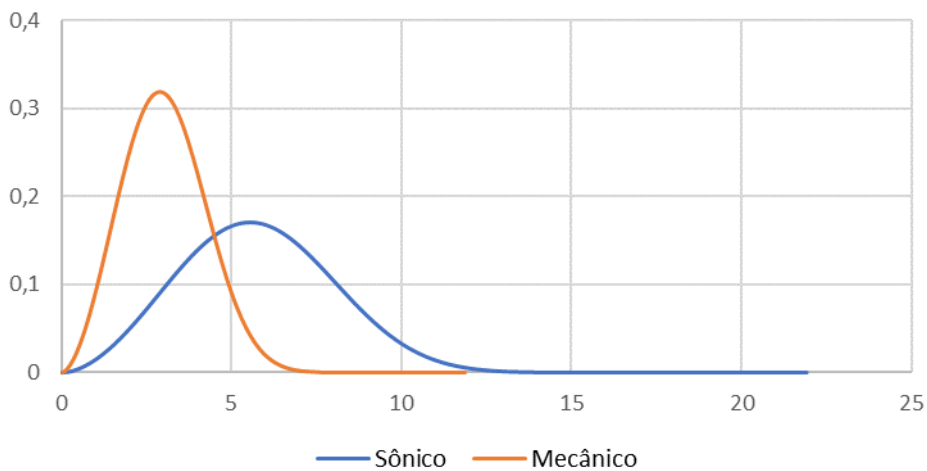


Gráfico 4: Distribuição de Weibull para o sensor de 25 metros da estação de São Martinho da Serra

Ao analisar as diferenças entre as curvas obtidas para essas duas regiões identificou-se erros nas medições dos dados, o que compromete o estudo dessas regiões. A existência desses erros somente pode ser verificada na comparação entre os anemômetros, pois os dados entre si possuem consistência, porém quando são comparados aos dados do outro anemômetro, o perfil das duas curvas são diferentes, ou seja, não há consistência entre os dados dos diferentes anemômetros. Portanto decidiu-se por não utilizar os dados das estações de Brasília e São Martinho da Serra para não comprometer os resultados do estudo.

### 3.5 Caracterização da Área de Estudo

O município de Petrolina se localiza na região Nordeste (NE) do Brasil (Mapa 1), a qual é caracterizada por ter uma grande variedade climática que se estende desde do clima semi-árido presente no interior da região até o clima chuvoso da costa leste dessa mesma região. A área de estudo está contida no interior do NE que tem precipitação acumulada inferior a 500 mm/ano e temperaturas elevadas em todas as estações do ano. A região sofre com períodos longos de seca e com períodos curtos de intensa precipitação.





Mapa 1: Região Nordeste (Fonte: IBGE)

Os dados utilizados para esse estudo são dos meses de dezembro, janeiro e fevereiro que são meses contidos na estação do verão. O período chuvoso dessa região geralmente ocorre entre os meses de fevereiro a maio e o período de seca entre os meses de agosto a outubro, com um percentual de déficit hídrico de pelo menos 70% do ano.

### 3.6 Qualificação dos Dados

A rede SONDA utiliza as estratégias de controle de qualidade de dados adotada pela Baseline Surface Radiation Network (BSRN) em combinação com os critérios de análise estabelecidos pela Webmet.com para os dados meteorológicos e anemométricos.

Ela não altera a base de dados original, mas sinaliza os dados suspeitos de estarem incorretos. O processo de controle de qualidade é composto por quatro etapas sequenciais, sinalizando os dados possivelmente incorretos (Tabela 1). A etapa 1, verifica se os dados estão dentro dos limites físicos. A etapa 2, verifica a frequência com que esse dado ocorre e se ele pode ser considerado extremamente raro. A etapa 3, verifica se a evolução temporal condiz com o esperado para a variável. A etapa 4, verifica se o dado é consistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação da rede SONDA.

**Tabela 5: Etapas de Validação**

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| <b>Etapa 1</b> | Fisicamente Possível           |
| <b>Etapa 2</b> | Extremamente Raro              |
| <b>Etapa 3</b> | Evolução Temporal Esperada     |
| <b>Etapa 4</b> | Consistente com outras Medidas |

O dado só poderá prosseguir para a próxima etapa se for aprovado na etapa anterior. Se o dado não obtiver aprovação o processo será interrompido e o dado receberá o código de suspeito. Os códigos numéricos são os resultados de cada uma das etapas anteriormente aplicadas (Tabela 2). Eles são lidos da direita para a esquerda, classificando o dado em nenhum procedimento executado, dado suspeito de ser incorreto, procedimento não pode ser executado e dado de boa qualidade ou não suspeito.

**Tabela 6: Código para o Controle de Qualidade para Dados Meteorológicos**

| <b>Código</b> | <b>Significado</b>                  |
|---------------|-------------------------------------|
| 0             | Nenhum Procedimento Executado       |
| 2             | Dado Suspeito de ser Incorreto      |
| 5             | Procedimento não pode ser Executado |
| 9             | Dado de Boa Qualidade               |

As variáveis anemométricas descritas na Tabela 3, tiveram seus limites baseados nos critérios da Webmet.com e o dado só poderá ser sinalizado como de boa qualidade se atender a esses limites.

**Tabela 7: Variáveis Anemométricas**

| <i>Fisicamente Possível</i>      | <i>Extremamente Raro</i>                     | <i>Evolução Temporal</i>                       | <i>Comparação entre Sensores</i>  |
|----------------------------------|--|--|---|
| <b>Temperatura (°C)</b>          |  |  |   |
| Mínimo absoluto local            | Variação < 5° no período de 1h               | Variação > 0,5° no período de 12h consecutivas | -   |
| Máximo absoluto local            |  |  |   |
| <b>Velocidade do Vento (m/s)</b> |  |  |   |
| Mínimo (0)                       | Variação < 0,1 no período de 3h consecutivas | Variação < 0,5 no período de 12h consecutivas  | Num mesmo momento: dado do sensor mais alto > dado do sensor mais baixo |
| Máximo (25)                      |  |  |   |
| <b>Direção do Vento (graus)</b>  |  |  |   |
| Mínimo (0°)                      | Variação > 1° no período de 3h consecutivas  | Variação > 10° no período de 18h consecutivas  | -   |
| Máximo (360°)                    |  |  |   |

Os dados anemométricos coletados na cidade de Petrolina foram submetidos aos algoritmos de qualificação adotados pela rede SONDA. A comparação entre os dados aprovados dos anemômetros sônico e mecânico se encontram nos Gráficos 5 e 6.

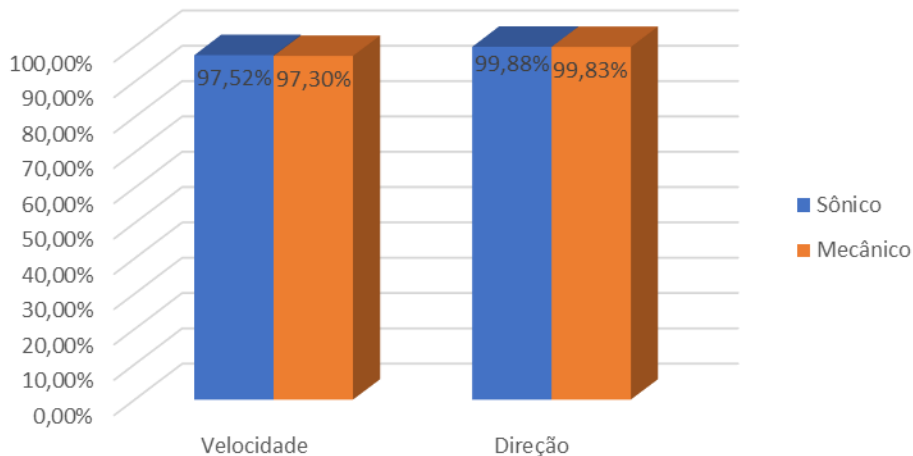


Gráfico 5: Comparação à 25 metros dos dados aprovados

Ao analisar os gráficos dos dados qualificados pode-se perceber que o sensor sônico obteve mais dados aprovados em todas as etapas do que o mecânico. A diferença entre os anemômetros no Gráfico 5 é maior no registro da velocidade do que no da direção, o que pode ser explicado pelas características técnicas do anemômetro mecânico, como por exemplo a inércia de rotação da hélice.

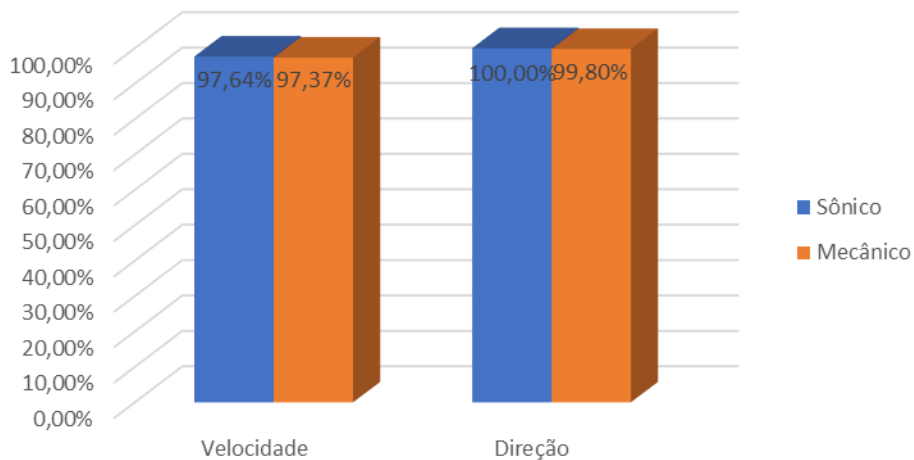


Gráfico 6: Comparação à 50 metros dos dados aprovados

A altura de cinquenta metros os dados qualificados mostram que existe uma diferença nos registros das variáveis. Ao comparar com os dados coletados a vinte e cinco metros com os de cinquenta metros pode-se notar que a diferença dos dados aprovados em relação a direção do vento aumentou consideravelmente no Gráfico 6.

Analisando os resultados da qualificação para a velocidade do vento exibidos na Tabela 8, verifica-se que houve um maior número de erros com código 2999 em ambos os sensores, o qual significa que o dado é suspeito de estar incorreto, pois o dado do sensor mais alto estava menor do que o dado do sensor mais baixo no mesmo momento (quarta etapa da qualificação). O código 2992 significa que o dado não estava entre os valores mínimo (0 m/s) e máximo (25 m/s), sendo esse a primeira etapa da qualificação e que o dado do sensor mais alto estava menor do que o do sensor mais baixo, assim como os dados anteriormente citados. O próximo código apontado foi o 9992, o qual indica que o dado é suspeito de estar incorreto, pois não foi aprovado na primeira etapa. Observa-se ainda que o anemômetro sônico apresentou menos dados incorretos do que o mecânico.

**Tabela 8: Qualificação da Velocidade do Vento**

| Velocidade do Vento    |                       |            |                     |            |
|------------------------|-----------------------|------------|---------------------|------------|
| Código de Qualificação | Qualificação Mecânico |            | Qualificação Sônico |            |
|                        | 25 metros             | 50 metros  | 25 metros           | 50 metros  |
| 2999                   | 359                   | 342        | 343                 | 343        |
| 2992                   | 11                    | 28         | 0                   | 0          |
| 9992                   | 12                    | 3          | 17                  | 0          |
| <b>Total</b>           | <b>382</b>            | <b>373</b> | <b>360</b>          | <b>343</b> |

A qualificação dos dados de direção do vento indicou um menor número de erros do que a da velocidade, como verifica-se na Tabela 9. O erro acusado foi na primeira etapa, a qual impõe que o valor tem que estar entre um valor mínimo (0°) e um valor máximo (360°). Assim como na qualificação da velocidade observa-se que o anemômetro sônico apresenta um menor número de dados incorretos do que o mecânico.

**Tabela 9: Qualificação da Direção do Vento**

| Direção do Vento       |                       |           |                     |           |
|------------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------|
| Código de Qualificação | Qualificação Mecânico |           | Qualificação Sônico |           |
|                        | 25 metros             | 50 metros | 25 metros           | 50 metros |
| 992                    | 24                    | 28        | 17                  | 0         |
| <b>Total</b>           | <b>24</b>             | <b>28</b> | <b>17</b>           | <b>0</b>  |

## 4.0 Resultados

Ao estudar os dados e os critérios de qualificação a que eles são submetidos foi observado que seria possível estabelecer uma reta de máximo e uma de mínimo, as quais limitariam os dados a um intervalo onde encontra-se a maior densidade deles, com o objetivo de qualificar os dados de forma mais criteriosa.

Nos gráficos que relacionam temporalmente a velocidade medida a 25 metros com a medida a 50 metros foram traçadas as retas de tendência (equação presente na legenda) como reta de referência em cada um dos gráficos, como se verifica nos Gráficos 7 e 8.

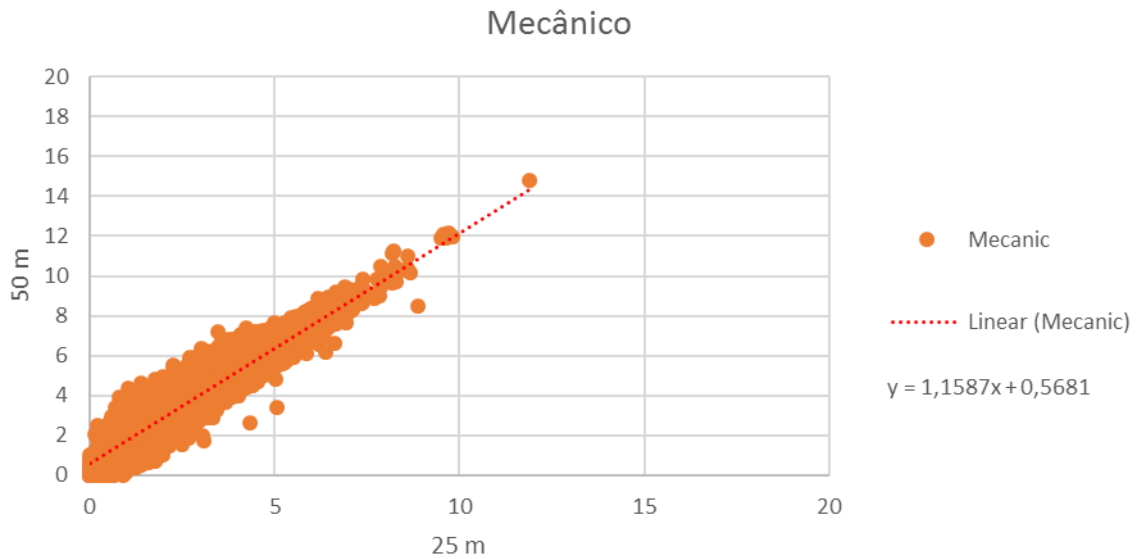


Gráfico 7: Retas de tendência para os dados do anemômetro mecânico

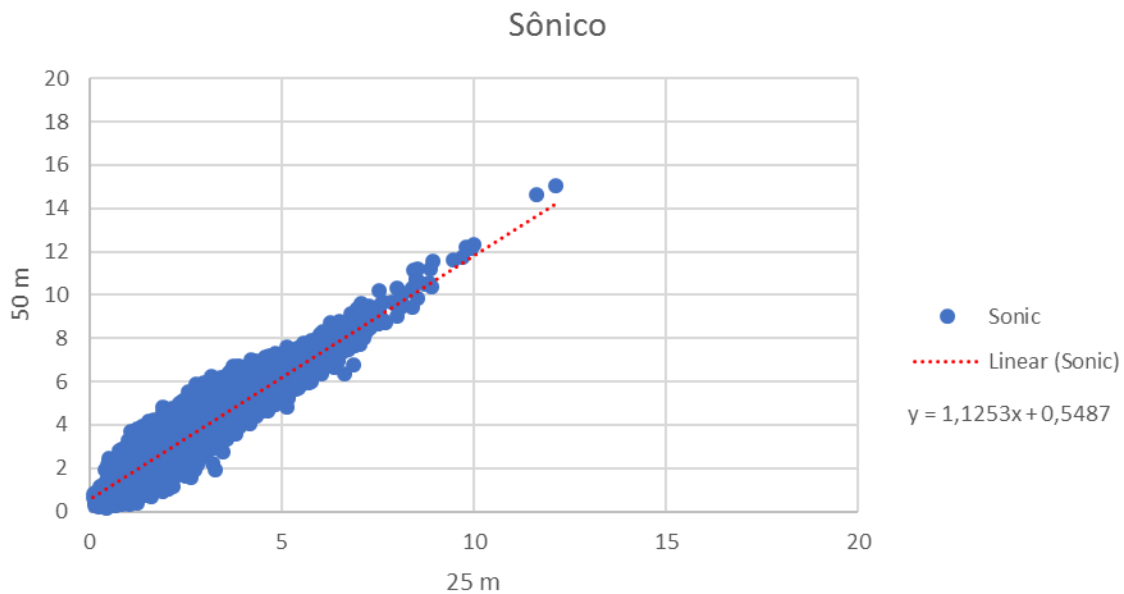


Gráfico 8: Retas de tendência para os dados do anemômetro sônico

O limite superior foi equacionado ao estabelecer a coordenada  $x$  inicial igual a zero e calculando seu par de coordenada como sendo 0.5681 mais uma constante  $C_1$ , estabelecida como sendo 2.5 devido ao melhor ajuste da reta. A coordenada  $x$  final foi calculada utilizando a equação da reta de tendência para um  $y$  final igual a 25. Calculado um ponto inicial e um final, foi possível calcular a inclinação da reta através da Equação 2.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2)$$

Os valores obtidos utilizando essa metodologia podem ser observados na Tabela 10.

**Tabela 10: Valores da Reta do Limite Superior**

| x        | y      | C <sub>1</sub> | m <sub>1</sub> |
|----------|--------|----------------|----------------|
| 0        | 3.0681 | 2.5            | 1.040135903    |
| 21.08561 | 25     |                |                |

O limite inferior foi equacionado utilizando como eixo principal o eixo  $x$ . A coordenada  $y$  inicial estabelecida foi igual a zero e a coordenada  $x$  inicial foi calculada somando 0.5681 a constante  $C_2$ , a qual é igual a 0.8 para um melhor ajuste da reta aos dados. As coordenadas  $x$  e  $y$  final foram estabelecidas como as mesmas do limite superior, sendo o ponto de encontro desses dois limites. Calculou-se então a inclinação da reta utilizando a Equação 2 e os resultados podem ser verificados na Tabela 11.

**Tabela 31: Valores da Reta do Limite Inferior**

| x        | y  | C <sub>2</sub> | m <sub>2</sub> |
|----------|----|----------------|----------------|
| 1.3681   | 0  | 0.8            | 0.7879804      |
| 21.08561 | 25 |                |                |

A metodologia utilizada foi a mesma para o cálculo dos limites inferiores e superiores dos dois anemômetros e como as retas de tendência possuem valores muito próximos foi possível utilizar os valores obtidos no gráfico do anemômetro mecânico para equacionar os limites do sônico. Os Gráficos 9 e 10 representam os dados com os limites calculados.

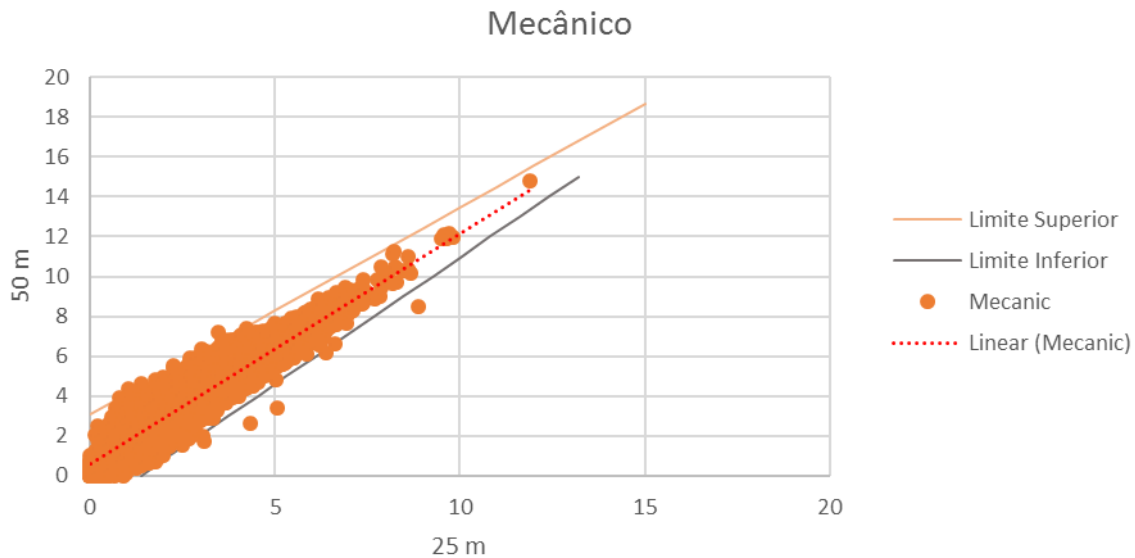


Gráfico 9: Limites Superior e Inferior aplicado aos dados do anemômetro mecânico

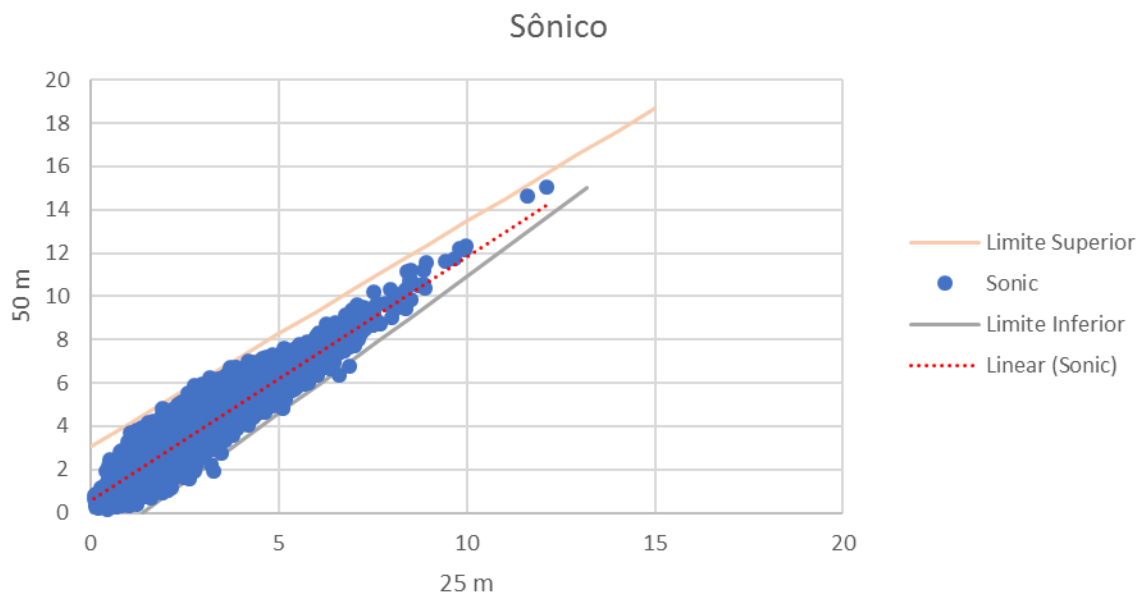


Gráfico 10: Limites Superior e Inferior aplicado aos dados do anemômetro sônico

Após equacionar as retas limites, aplicou-se esse novo critério aos dados como o algoritmo cinco de qualificação dos dados de velocidade do vento. O Gráfico 11 representa em porcentagem a quantidade de dados aprovados em todos os algoritmos para a altura de 50 metros.

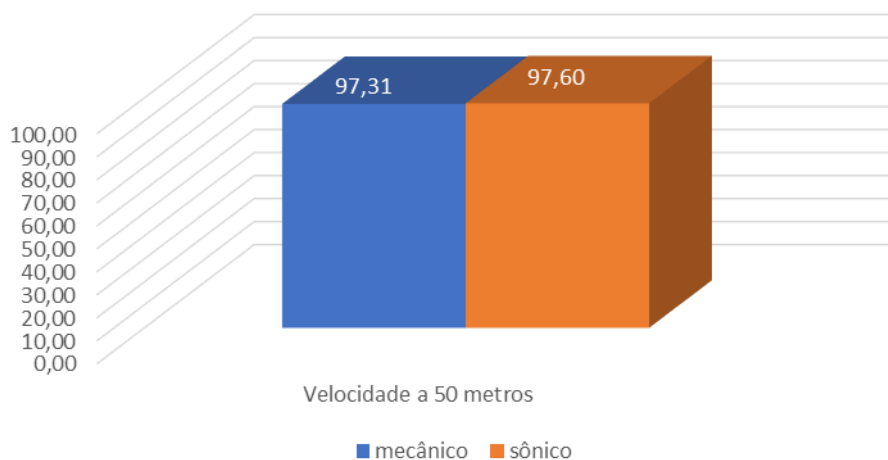


Gráfico 11: Porcentagem de dados aprovados no sensor de 50 metros

Anteriormente a aplicação do novo critério, a porcentagem de dados aprovados era de 97.64% para o anemômetro sônico e de 97.37% para o mecânico para a altura de 50 metros. Verifica-se, então a diminuição dessa porcentagem devido a mais uma etapa de qualificação.

O Gráfico 12 representa em porcentagem a quantidade de dados aprovados em todos os algoritmos para a altura de 25 metros. A altura de 25 metros o resultado foi semelhante, pois os valores anteriores eram de 97.52% e de 97.3%, sendo o sônico e o mecânico respectivamente. Observa-se nesse caso que a porcentagem do primeiro instrumento não se alterou, ou seja, esse algoritmo não interferiu nessa qualificação. Enquanto que o segundo valor referente ao mecânico diminuiu quando foi aplicado o novo algoritmo.

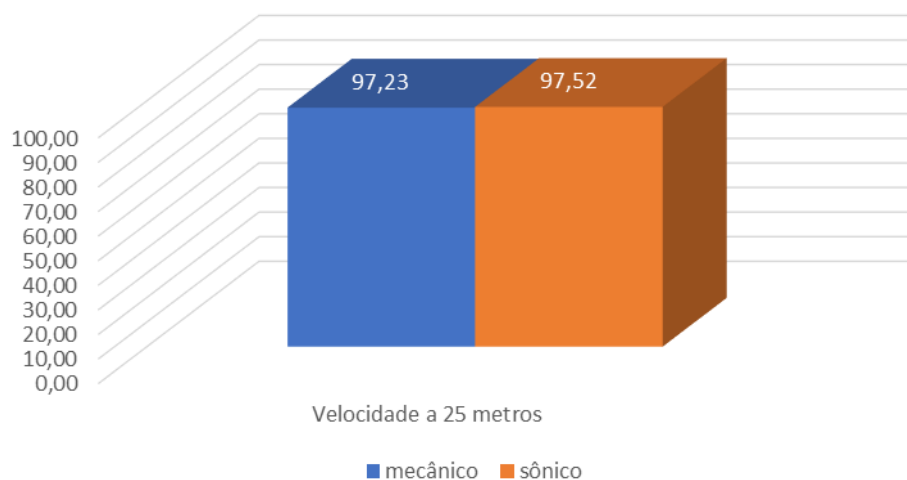


Gráfico 12: Porcentagem de dados aprovados no sensor de 25 metros

A Tabela 12 detalha as falhas identificadas pelos algoritmos nos dois instrumentos de princípios diferentes. O código 22999, presente na tabela indica falha nos algoritmos quatro e cinco que significam que a velocidade medida pelo sensor a 25 metros é maior do que a medida a 50 metros num mesmo tempo e que o dado se encontra fora dos limites estabelecidos pelo novo critério, respectivamente. O código 29992 significa que o primeiro e o quinto algoritmo não foram satisfeitos, portanto o dado se encontra fora do intervalo de 0 a 25 m/s e fora dos limites do novo critério. O código 29999 indica que somente o algoritmo cinco não aprovou, o 92992 teve falha no primeiro e no quarto algoritmo. O código 92999 indica falha somente no quarto algoritmo e o 99992 indica falha somente no primeiro algoritmo.

**Tabela 42: Qualificação da Velocidade do Vento**

| Código de Qualificação | Mecânico   |            | Sônico     |            |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                        | 25 metros  | 50 metros  | 25 metros  | 50 metros  |
| 22999                  | 12         | 12         | 5          | 5          |
| 29992                  | 0          | 3          | 6          | 0          |
| 29999                  | 11         | 8          | 0          | 6          |
| 92992                  | 11         | 28         | 0          | 0          |
| 92999                  | 347        | 330        | 338        | 338        |
| 99992                  | 12         | 0          | 11         | 0          |
| <b>Total</b>           | <b>393</b> | <b>381</b> | <b>360</b> | <b>349</b> |

Na Tabela 12, nas colunas referentes ao anemômetro sônico, encontra-se o código 22999, o qual indica falha nos algoritmos quarto e quinto que indicam que a velocidade medida pelo sensor a 25 metros é maior do que a medida a 50 metros num mesmo tempo e que o dado se encontra fora dos limites estabelecidos pelo novo critério, respectivamente. O código 29992 significa que o primeiro e o quinto algoritmo não foram satisfeitos, portanto o dado se encontra fora do intervalo de 0 a 25 m/s e fora dos limites do novo critério. O código 92999 indica falha no quarto algoritmo, já o código 99992 indica falha no primeiro e o código 29999 indica falha no quinto. Observa-se também que mesmo aplicando mais



um critério de qualificação o sensor sônico manteve-se com um menor número total de dados indicados como incorretos, o que é interessante, pois esse quinto algoritmo foi desenvolvido com base no sensor mecânico.

O outro critério sugerido foi o de verificar se a média calculada pelo sensor da velocidade do vento em dez minutos estava entre a máxima e a mínima velocidade medida nesse mesmo intervalo. Ao verificar os dados registrados pelos sensores identificou-se que esse algoritmo poderia ser aplicado apenas aos dados do anemômetro sônico, pois o mecânico não faz os registros de máximo e mínimo e nem o registro a cada minuto. Aplicou-se, então, a verificação da média calculada para os dez minutos do anemômetro sônico e apenas os dados registrados como 'NaN' (Not a number) estavam fora do máximo e do mínimo, sendo eles identificados para a altura de 25 metros e numa quantidade total de 17 registros.

## 5.0 Conclusão

O estudo dos diferentes documentos de qualificação auxiliou no desenvolvimento desse relatório com a identificação de melhorias a serem implementadas na qualificação de dados da rede SONDA. A diferenciação dos anemômetros sônico e mecânico foi realizada com base nos manuais técnicos de cada sensor e com base nos dados registrados pela estação meteorológica de Petrolina.

A qualificação dos dados utilizando o critério que considera a densidade de distribuição dos dados pode ser aplicada a outras estações calculando-se as constantes  $C_1$  e  $C_2$  para cada uma delas. O número de dados que foram descartados com esse algoritmo foi no total 25 dados, sendo 19 do anemômetro mecânico e 6 do sônico. Esse critério pode ainda ser aprimorado com o ajuste da reta para uma curva que represente melhor essa distribuição dos dados.

O segundo algoritmo sugerido atua no momento inicial de qualificação, diferente do primeiro que proporciona um maior refinamento dos dados. Esse segundo algoritmo que verifica se a média da velocidade do vento no tempo igual a dez minutos está entre o máximo e mínimo valor medido para essa variável obteve um resultado de 100% de aprovação no conjunto de dados aqui estudado, porém é considerado um critério significativo, pois pode auxiliar na identificação de mal funcionamento do sensor.

O conjunto de dados estudado é considerado de boa qualidade, pois aplicando-se mais algoritmos, a maioria dos dados passou em todas as etapas de qualificação. Observou-se também, a possibilidade de fazer um teste de consistência entre anemômetros diferentes em uma mesma região de modo a auxiliar a identificação de falhas nos sensores.

Ao considerar a possibilidade de que os anemômetros mecânicos venham a ser substituídos pelos sônicos, os critérios de qualificação já aplicados pela rede SONDA podem se manter, sendo necessária algumas modificações. Os limiares adotados deverão ser reconsiderados de acordo com as especificações técnicas do anemômetro sônico e o desenvolvimento de estudos para melhorar a precisão desse sensor poderão ser incentivados.

## 6.0 Referências

- AWS Scientific, I. (1997). *Wind Resource Assessment Handbook*. Albany. Acesso em Março de 2017.
- Campbell Scientific (Canada) Corp. (2015). *Instruction Manual R.M. Young Wind Monitors*. Acesso em Março de 2017.
- Gill Instruments Limited. (2006). *WindSonic User Manual*. Hampshire. Acesso em Março de 2017.
- Internacional Electrotechnical Commission (IEC). (2005). *Internacional Standard 61400-12-1* (1 ed.). Geneva, Suíça: IEC. Acesso em Março de 2017.
- Martins, R., Guarnieri, R., & Pereira, E. (2008). O Aproveitamento da Energia Eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, 02-13. Acesso em Março de 2017.
- Measuring Network of Wind Energy Institutes. (2009). *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions Version 1*. MEASNET. Acesso em Março de 2017.
- Ministério de Minas e Energia. (2012). (Nota Técnica DEA 04/12). *Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos*. Rio de Janeiro. Acesso em Março de 2017.
- R.M. Young Company. (2007). *Marine Wind Sensor*. Traverse City. Acesso em Março de 2017.
- United States Environmental Protection Agency. (2000). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. Acesso em Março de 2017.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Geneva, Suíça: Chairperson, Publications Board. Acesso em Março de 2017.