XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE UM PARQUE EÓLICO E SEU INCÔMODO CAUSADO AOS MORADORES

Bruna S. Alencar (1); Luiz Henrique M. C. Pereira (2); Erasmo Felipe Vergara (3)
(1) Arquiteta, Mestranda em Arquitetura e Urbanismo na UFSC, bsalencar@gmail.com
(2) Graduando em Engenharia Mecânica na UFSC, luizmcpereira@gmail.com
(3) Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica na UFSC, e.f.vergara@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica,
Laboratório de Vibrações e Acústica, Florianópolis–SC, 88040-900

RESUMO
O ruído de aerogeradores de vento deve ser mensurado e analisado de forma específica, visto que é altamente dependente da velocidade do vento, da temperatura e do relevo do local. O objetivo deste trabalho é caracterizar o ruído de um parque eólico na região sul do Brasil por meio de medições diurnas e noturnas durante o funcionamento dos aerogeradores e em momentos que eles permanecem desligados com base na avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas. Os dados foram analisados com os descritores $L_{Aeq,10min}$; $L_{Aeq,global}$; $L_{A10,10min}$, $L_{A90,10min}$ e espectro sonoro. As medições no período diurno não apresentaram grandes variações com e sem a presença de aerogeradores, prevaleceram as medições de $L_{Aeq,10min}$ abaixo de 40 dB(A) - limite estabelecido pela norma NBR 10.151 para áreas rurais. O período noturno foi avaliado apenas com os aerogeradores ligados, o que resultou em níveis entre 37,5 e 43,3 dB(A); superiores aos 35 dB(A) propostos pela norma. O NPI calculado para o período diurno mostra que a fonte de ruído pode ser considerada perceptível a notável pela comunidade local, podendo ainda ser esperada uma possível resposta adversa das pessoas até uma resposta adversa concreta. No período diurno, o ruído proveniente do funcionamento do parque eólico é perceptível pela variação maior que 3 dB do nível de pressão sonora, entretanto está dentro do limite da norma. Por outro lado, o nível de pressão sonora monitorado à noite, além de estar acima da norma, pode trazer possíveis efeitos negativos à saúde dos moradores da região.
Palavras-chave: aerogeradores de vento, parque eólico, impacto ambiental acústico, ruído ambiental.

ABSTRACT
Wind turbine noise must be measured and analyzed in a specific technique because it is highly dependent on the wind speed, temperature and terrain. The goal of this paper is to characterize the noise from a wind farm in the south of Brazil trough day and night measurements with the wind turbine working and shut down based on the Brazilian standard NBR10.151. The data were assessed with $L_{Aeq,10min}$; $L_{Aeq,global}$; $L_{A10,10min}$, $L_{A90,10min}$ and sound spectrum. The morning measurements didn't show many variations with and without the shutdown of the wind turbine, the majority of the $L_{Aeq,10min}$ were under 40 dB(A) - threshold established by the Brazilian standard to rural areas. The nighttime was assessed only with turbines on, which resulted in levels between 37,5 and 43,3 dB(A); above 35 dB(A), which is the limit established by the standard. The NPI value calculated for daytime shows that the source could be considered perceptible to noticeable for the community and result in a potentially adverse to an adverse response. In daytime, the noise from wind turbine is perceived because of the variation above 3 dB in sound pressure level, meanwhile still below the threshold. Unlike the measurements in nighttime, which besides being above the limit, could affect the healthy of the community.
Keywords: wind turbine, wind farm, acoustic environmental impact, environmental noise.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco edições do Balanço Energético Brasileiro - BEN, a produção de energia elétrica a partir da energia eólica aumentou exponencialmente (EPE, 2018). É uma fonte renovável, a qual o país possui grande capacidade de produção e sua geração não está diretamente ligada à liberação de gases poluentes na atmosfera.

O grande investimento em um parque eólico vem acompanhado de estudos sobre possíveis impactos ambientais, sendo um deles o ruído. O ruído do funcionamento de um aerogerador de vento mais incômodo é o aerodinâmico, o qual deve-se à incidência das massas de ar nas pás - ou seja, altamente dependente das condições atmosféricas e do regime de vento do local (BOWDLER; LEVENTHALL, 2011).

A situação para medição de nível de pressão sonora em um parque eólico é bastante peculiar, diferente de outras medições em ambientes externos. Apresenta-se por altas velocidades do vento e um nível de ruído residual que varia de acordo com a velocidade do vento (BOWDLER; LEVENTHALL, 2011). Por isso, diversos países que utilizam a energia eólica, como Nova Zelândia, Holanda e Austrália, possuem normas específicas para medição e limites para o nível de ruído produzido por aerogeradores de vento.

O Brasil não possui legislação específica visando os parques eólicos, sendo utilizada a NBR 10.151- Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas; aplicação de uso geral. Ela disponibiliza o nível de pressão sonora máximo (L_{Aeq}) permitido conforme a área habitada e o período. Entretanto ela demonstra-se limitada ao caracterizar os requisitos ambientais para medição, os quais não contemplam a diversidade do ambiente encontrado em parques eólicos.

Outros parâmetros também são usados para caracterizar o ruído em parques eólicos como o L_{A10}, L_{A90} e o espectro sonoro. Eles permitem entender a variação do nível de pressão sonora em decorrência da ausência do vento e consequente funcionamento das turbinas, além de possibilitar decifrar o porquê desse ruído ser incômodo. Esses parâmetros podem ser obtidos por programas habilitados pelo sonômetro utilizado para medição, como é o caso do *dBtrait*.

Assim como o ruído produzido pelos aerogeradores é condicionado pela velocidade do vento, o ruído residual também sofre essa interferência, destacando-se o som atribuído a interação da vegetação com o vento – muito presente no entorno dos aerogeradores (HESLER e HESLER, 2006). Objetivando uma identificação correta do ruído produzido apenas pelos aerogeradores nas medições, além da percepção da mudança do nível de ruído em relação a diferentes condições atmosféricas, diversos autores sugerem um monitoramento de longa duração como o mais apropriado para estudos em aerogeradores de vento (HANSEN, C. H., DOOLAN, C. J. e HANSEN, K. L, 2017; HESSLER JR, 2008).

No país ainda não há estudos que visam o conforto acústico em parques eólicos, vale salientar que diferente de alguns países em que os aerogeradores são instalados em áreas densamente habitadas, no Brasil eles são instalados em áreas rurais pouco ocupadas. O que diminui a quantidade de pessoas afetadas pelo problema. Em relação a sua implantação, a resolução do Conama Nº462 determina que em caso de alto impacto ambiental seja feito um estudo caracterizando os índices de ruído em parques eólicos que estejam posicionados a menos de 400 m de distância de residências (BRASIL, 2014).

No decorrer dos anos, diversos estudos sobre o efeito do ruído de aerogeradores na saúde humana apresentaram conclusões adversas, entre elas a influência negativa de infrassons e sons de baixa frequência, os quais não são audíveis ao ser humano, mas alguns estudos relacionam com problemas de saúde; incômodo dos ruídos em intervalos regulares, ocorrência de insônia e irritabilidade com níveis de pressão sonora acima de 40 dB(A), e até mesmo que as reações fisiológicas tenham maior relação com a percepção negativa dos aerogeradores do que o próprio nível de ruído (KNOPPER e OLLSON, 2011).

Visando o conforto das pessoas expostas, tem-se o critério NPI (Noise Perception Index), o qual quantifica o aumento do nível de pressão sonora do aerogerador em relação ao nível do ruído residual. O descritor traz possíveis percepções e reações dos indivíduos expostos com o acréscimo do ruído. Ele pode ser extremamente útil no auxílio da criação de limites de nível de pressão sonora para parques eólicos específicos, levando em consideração o nível de ruído residual de determinado local (HUNT e HANNAH, 2009).

Em 2018, a OMS (Organização Mundial da Saúde) publicou recomendações de nível de ruído em relação a diversas fontes com base em estudos realizados em países europeus. É sugerido, condicionalmente (em razão dos poucos estudos), que o ruído produzido pelos aerogeradores, em termos do nível dia-entardecer-noite L_{DEN}, seja menor que 45 dB(A), visto que acima disso pode trazer risco à saúde, como irritação e problemas no sono (WHO, 2018).

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo caracterizar o ruído de um parque eólico na região Sul do Brasil, por meio da análise de medições de nível de pressão sonora realizadas em diferentes situações – durante o período diurno e noturno, assim como em momentos que os aerogeradores de vento estão em operação ou desligados.

3. MÉTODO

Este trabalho foi realizado em três etapas principais, sendo elas: medições do nível de pressão sonora no parque eólico; refinamento dos dados a serem utilizados; análise dos dados escolhidos.

3.1. Medições do nível de pressão sonora

O parque eólico foi projetado com 241 aerogeradores em uma área que abriga 29 residências. As medições ocorreram nos dias 17 e 18 de abril de 2018 por aproximadamente 22 horas. Por falta de comunicação, não foi possível confirmar se todos os aerogeradores estavam funcionando no período de medição, apenas os mais próximos. Essas medições foram realizadas com propósito de analisar o ruído causado pelos aerogeradores de vento, e não para analisar o nível de pressão sonora com e sem o funcionamento dos mesmos. Logo, não foi possível obter dados do período noturno sem o ruído dos aerogeradores, além das 24 horas completas de medição.

As medições seguiram as orientações da NBR 10.151. O modelo de sonômetro utilizado foi *01dB Fusion*; ele ficou posicionado a uma altura de 1,2 m e foi operado com uma bateria externa por causa da longa duração da medição. As condições climáticas foram monitoradas por uma base meteorológica posicionada a pelo menos 2 m do sonômetro. A Figura 1 mostra o posicionamento dos equipamentos no momento da medição em relação aos aerogeradores no parque eólico e a figura 2 apresenta a distância dos aerogeradores mais próximos – o aerogerador 1 (AE 1) a 431 m de distância ao norte e o aerogerador 2 (AE 2) a 569 m de distância no sentido noroeste. O local de medição encontra-se afastados das residências do parque eólico.



Figura 1: Foto da medição no parque eólico (LUZ, 2018).



Figura 2: Foto aérea da posição do monitoramento (LUZ, 2018).

O método de medição utilizado foi o de longa duração, apesar das medições não ocorrerem em um dia completo. Ele é indicado para fins de planejamento urbano, sendo feita uma avaliação diurna e outra noturna para serem comparadas com o limite estabelecido pela norma (ABNT, 2019).

3.2. Refinamento dos dados

De modo geral, os dados foram separados em três categorias para análise conforme mostra a Tabela 1:

A. Medição no período diurno com funcionamento dos aerogeradores de vento: dia 17/04/2018, terça-feira, das 12h50 até às 14h50 e das 17h10 até às 22h.
B. Medição no período diurno sem funcionamento dos aerogeradores de vento: dia 17/04/2018, terça-feira, das 15h até às 16h50 e dia 18/04/2018, quarta-feira, das 8h até às 10h20.
C. Medição no período noturno com funcionamento dos aerogeradores de vento: dia 17/04/2018, terça-feira, das 22h até às 7h.

Tabela 1 – Dados sobre os períodos de medição realizados

Medição	Aerogerador de vento	Período	Data
A	Em operação	12h50-14h50 e 17h10-22h00	17/04/2019
B	Desligado	15h00-16h50 e 8h00-10h20	17/04/2019 e 18/04/2019
C	Em operação	22h00-7h00	17/04/2019

3.3. Análise dos dados

O programa *dBtrait* foi utilizado para análise dos dados obtidos, o qual permite a visualização de diversos descritores e a extração dos mesmos. Com os devidos dados selecionados - $L_{Aeq,10min}$; $L_{Aeq,global}$; $L_{A10,10min}$, $L_{A90,10min}$ e espectro sonoro - foram escolhidos cinco critérios para caracterizar o parque eólico e incômodo causado aos moradores.

3.3.1. $L_{Aeq,10min}$ - Comparação com o nível de pressão sonora em função da área ocupada e período, segundo a NBR 10.151.

Conforme a NBR 10.151, a avaliação sonora em ambientes externos deve ter a medição do nível de pressão sonora comparada com o limite previsto de acordo com o período da medição e uso e ocupação do solo para ser considerada aceitável ou não (ABNT, 2019).

Em relação ao parque eólico estudado, temos a classificação da área habitada como área de residências rurais, com nível máximo permitido diurno de 40 dB(A) e noturno, 35 dB(A), como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de nível de pressão sonora segundo a NBR 10.151 (2019).

Tipos de áreas habitadas	**RL_{Aeq} - Limites de níveis de pressão sonora, dB(A)**	
	Período diurno	**Período noturno**
Área de residências rurais	40	35

O tempo de integração dos dados escolhidos para a análise do parque eólico foi de 10 minutos, contados a partir do começo de cada hora. Tal período é conveniente por geralmente também ser adotado para o armazenamento de dados nas estações meteorológicas, além de ser curto o suficiente para detectar variações rápidas nos níveis sonoros medidos (HESSLER, 2011). Hansen et al. (2017) sugerem um período de integração de 10 a 15 minutos.

3.3.2. Relação entre $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$

O nível estatístico $L_{A10,10min}$ pode ser definido como o nível de pressão sonora excedido em 10% do tempo da medição e $L_{A90,10min}$ o nível excedido em 90% do tempo. A comparação dos dois reflete a variação do nível de pressão sonora no decorrer da medição, sendo possível também detectar sons intrusivos ao objetivo do trabalho.

3.3.3. Relação entre velocidade do vento e $L_{Aeq,10min}$

A relação entre a velocidade do vento a 10 m de altura e o nível de pressão sonora é valiosa para estudos em parques eólicos, pois pode confirmar a alta dependência do ruído ambiente e dos aerogeradores com o regime de ventos da região. Entretanto, o tipo do terreno pode afetar a correlação entre esses dois dados (HESLER e HESLER, 2006).

3.3.4. Espectro da medição

Para complementar a análise das medições foram analisados os espectros sonoros por bandas de frequência de oitava, de 50 Hz a 10 kHz. A partir da composição espectral por bandas de frequência para os diferentes períodos é possível caracterizar o som gerado pelos aerogeradores e diferenciá-lo do ruído residual e de possíveis sons que poluem os dados medidos, como o som proveniente de animais passando pela estação de medição.

3.3.5. NPI

Proposto por Hessler Jr. (2008), o índice NPI visa oferecer uma avaliação justa e abrangente de uma nova fonte de ruído com base na percepção dos receptores possivelmente afetados, em medições de no mínimo 7 dias. Admite-se o uso do $L_{A90,10min}$ para ruído ambiente e L_{Aeq} para ruído da fonte, por meio da Equação 1:

$$NPI = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \{10[10^{L_{Aeq}/10} + 10^{(L_{A90})_i/10}] - (L_{A90})_i\} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:
NPI é o índice de percepção de ruído, dB(A);
$L_{A90,10min}$ é o ruído ambiente a cada 10 minutos, dB(A);
L_{Aeq} é o ruído com o funcionamento dos aerogeradores, dB(A);
N é o número de medições de $L_{A90,10min}$

De acordo com o resultado, temos 4 possíveis percepções e respostas da comunidade (HESSLER JR., 2008), sendo o NPI≤3dB(A) o resultado mais brando, o qual seria classificado como praticamente imperceptível e não geraria uma resposta da comunidade, até NPI>10dB(A), muito perceptível com respostas adversas (Tabela 3).

Tabela 3 - Percepção e resposta prevista da comunidade de acordo com NPI calculado segundo Hessler Jr. (2008).

NPI	Percepção	Resposta prevista da comunidade
≤ 3dBA	Praticamente imperceptível	Sem resposta
3 a 5dBA	Pouco perceptível a perceptível	Sem resposta a possível resposta adversa
5 a 10dBA	Perceptível a notável	Possível resposta adversa a resposta adversa
> 10dBA	Facilmente notável	Resposta adversa

4. RESULTADOS

Os resultados das medições do nível de pressão sonora serão apresentados de acordo com o período em que foram realizadas. Conforme apresentado na NBR 10.151, em dias de semana, o horário diurno é compreendido entre 7h e 22h e o período noturno seu complemento.

4.1. Período diurno

4.1.1. Sem a operação dos aerogeradores

De acordo com a Figura 3, todos os níveis de pressão sonora, $L_{Aeq,10min}$, avaliados estavam abaixo do limite estabelecido pela norma, ou seja, menores que 40 dB(A). O valor máximo mensurado foi de 37,1 dB(A).



Figura 3: Valores medidos de $L_{Aeq,10min}$ no período diurno com os aerogeradores desligados e o limite estabelecido pela NBR10.151 para área de residências rurais.

A Figura 4 apresenta os valores de $L_{Aeq,10min}$, $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ em dois momentos distintos com os aerogeradores desligados - o período de 15h até 16h50 e de 8h até 10h20. O segundo período chama atenção pelo aumento na diferença entre $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$. Essa maior variação no nível de pressão sonora pode ser correlacionada a grande variação da velocidade do vento, a qual atingiu valores mais altos do que registrado nas medições do dia anterior.

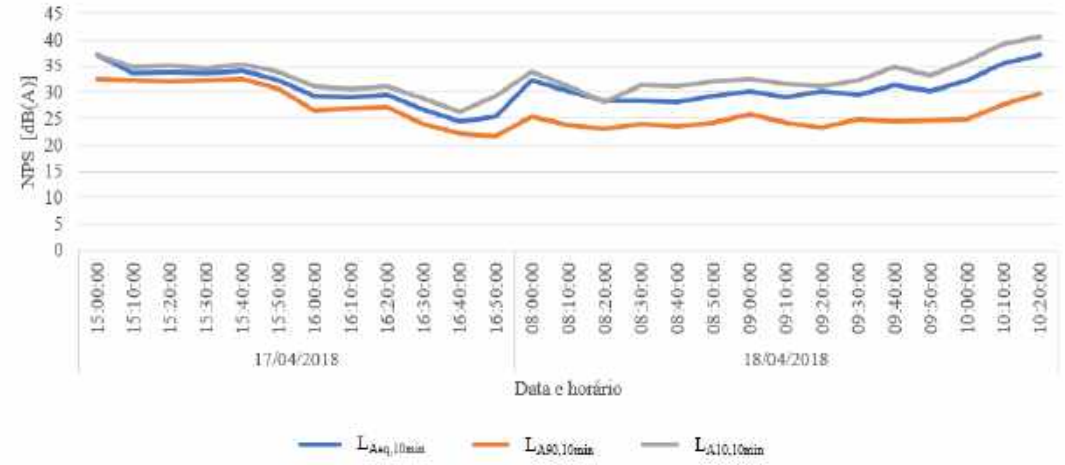


Figura 4: Relação entre $L_{Aeq,10min}$, $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ no período diurno com os aerogeradores desligados.

Os espectros sonoros médios do L_{eq} por bandas de frequência de terço de oitava com utilização do filtro A também foram analisados em dois momentos, apresentando dois perfis diferentes. Segundo a Figura 5, no período de 15h até às 16h50, as médias frequências (de 315 a 1,6k Hz) destacaram-se, enquanto que a Figura 6, a qual mostra o período de 8h até 10h20, mostrou que os maiores valores eram referentes às baixas (de 50 a 250 Hz). Apesar disso as bandas de frequências de 6,3k e 8k Hz correspondem a de menor valor.

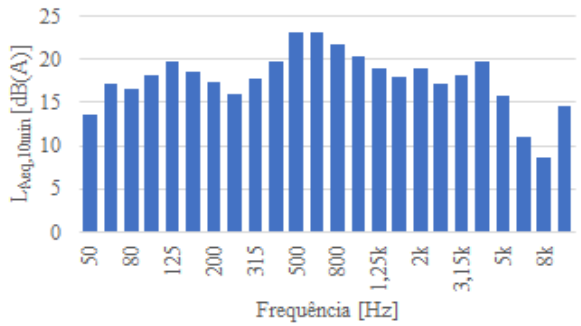


Figura 5: Espectro sonoro correspondente a medição de 15h até 16h50 com os aerogeradores desligados.

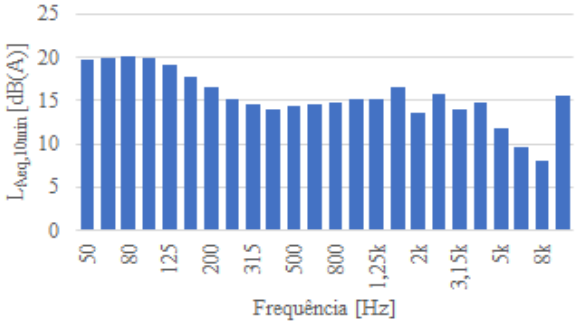


Figura 6: Espectro sonoro correspondente a medição de 8h até 10h20 com os aerogeradores desligados.

Foi determinada a regressão linear entre o $L_{Aeq,10min}$ e a média da velocidade do vento a cada 10 minutos. Como a estação meteorológica na medição estava a 1,2 metro do chão, as médias de velocidade de vento foram corrigidas para uma altura de 10 metros do chão. A razão entre as velocidades de vento medidas nas diferentes alturas do chão é igual à razão entre as alturas de medição elevada a um coeficiente de gradiente de vento. Este coeficiente depende da rugosidade do solo e da estabilidade atmosférica no local, neste caso foi utilizado o valor de 0,36, conforme o proposto por Hansen et al. (2017) para terrenos cobertos por capim com altura de 50 centímetros. No entanto os níveis de pressão sonora calculados não corresponderam com os medidos, impossibilitando que fosse estabelecida uma relação entre o $L_{Aeq,10min}$ e a velocidade média de vento.

4.1.2. Com a presença dos aerogeradores

No período diurno com os aerogeradores ligados, a maioria dos níveis de pressão sonora, $L_{Aeq,10min}$, analisados encontram-se dentro do limite estabelecido pela norma, com exceção de três situações - às 19h20, 20h10 e 20h20 (Figura 7).

Ao analisarmos a relação entre $L_{Aeq,10min}$, $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ pela Figura 8, percebemos 3 picos apenas nos gráficos do $L_{Aeq,10min}$ e $L_{A10,10min}$, sendo dois deles correspondentes aos valores acima do permitido pela norma, retratados na Figura 7. Apesar do som durante as medições não ter sido gravado, com base nesses picos para os valores do $L_{A10,10min}$ e do $L_{A90,10min}$ e na análise dos espectros sonoros específicos para esses horários, podemos supor que esses picos nos valores do $L_{Aeq,10min}$ referem-se a sons intrusivos - provavelmente de animais, que poderiam ser deletados em análises de parque eólicas mais completas.

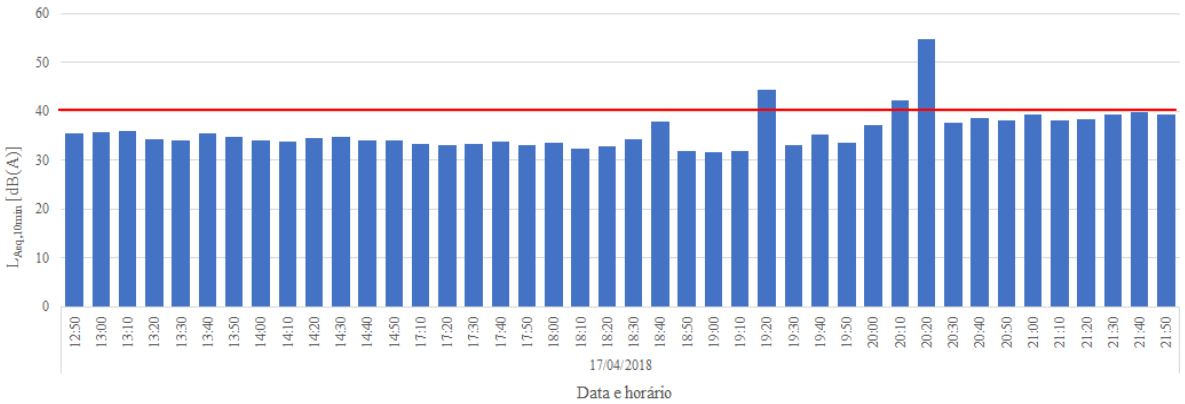


Figura 7: Valores medidos de $L_{Aeq,10min}$ no período diurno com os aerogeradores ligados e o limite estabelecido pela NBR10.151 para área de residências rurais.

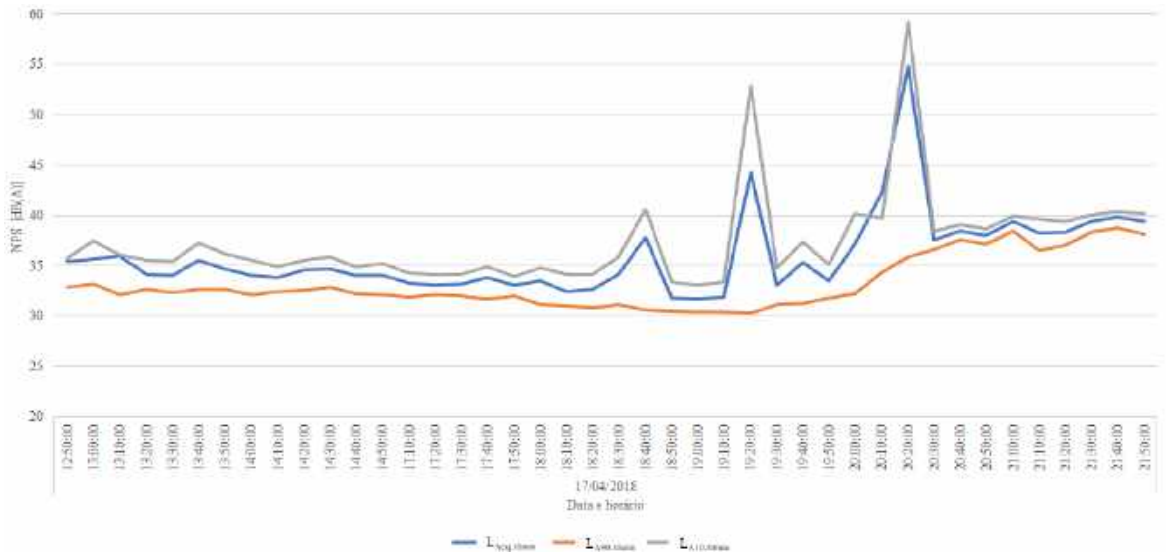


Figura 8: Relação entre $L_{Aeq,10min}$, $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ no período diurno com os aerogeradores ligados.

Os espectros sonoros médios do L_{eq} com o filtro A foram obtidos para dois períodos, expressos na Figura 9 - correspondente ao período de 12h50 até 14h50 e na Figura 10, correspondente ao período de 17h10 até 22h. Em ambas situações de avaliação percebe-se o mesmo perfil com os maiores valores nas médias frequências (de 315 a 1,6k Hz). O que corresponde ao espectro esperado para ruído de turbinas eólicas, o qual apresenta os maiores valores entre 250 e 2,5kHz (HANSEN, C. H., DOOLAN, C. J. e HANSEN, K. L, 2017).

No segundo período temos um nível de pressão sonora máximo de 37,6 dB(A) na frequência de 10kHz, o qual pode estar relacionado aos três picos de $L_{Aeq,10min}$ - possivelmente vinculado ao som de aves presentes na região durante as medições.

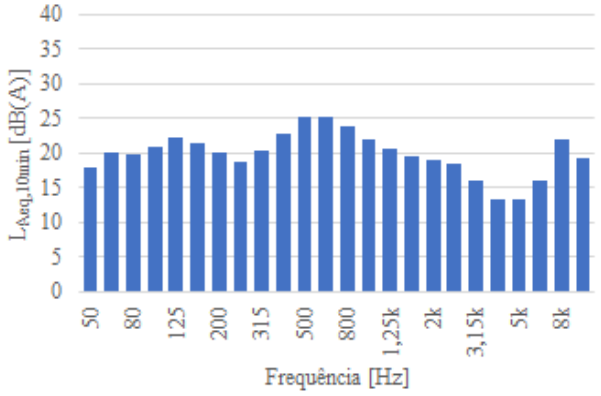


Figura 9: Espectro sonoro correspondente a medição de 12h50 até 14h50 com os aerogeradores ligados.

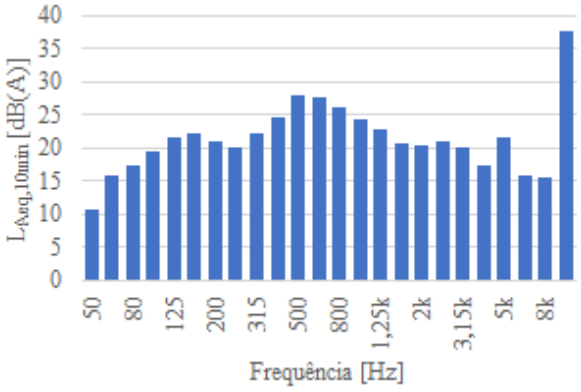


Figura 10: Espectro sonoro correspondente a medição de 17h10 até 22h com os aerogeradores ligados.

Utilizando o mesmo procedimento detalhado na seção anterior, foi determinada a regressão linear entre o $L_{Aeq,10min}$ e a média da velocidade do vento a cada 10 minutos. Não foi possível, porém, estabelecer uma relação entre a velocidade de vento média e os $L_{Aeq,10min}$ medidos, devido à discrepância entre os dados calculados e observados

4.1.3. Comparações entre os períodos diurnos

Analisando o $L_{Aeq,10min}$ do período diurno com e sem o funcionamento do aerogerador percebemos um pequeno aumento nos níveis de pressão sonora, porém os níveis ainda se encontram majoritariamente dentro do limite de 40 dB(A) previsto para residências rurais na NBR10.151. Se analisarmos juntamente a velocidade do vento, temos uma velocidade média maior no período em que o aerogerador esteve desligado. Logo pode-se esperar níveis de pressão sonora maiores do que os medidos com o aerogerador ligado.

De modo geral a variação do nível de pressão sonora é perceptível para a comunidade, pois houve uma variação maior que 3 dB com o funcionamento dos aerogeradores. Em relação ao espectro, no segundo momento as médias frequências (de 315 a 1,6k Hz) continuam se destacando, porém com mais intensidade.

Mesmo com poucos dados disponíveis que representassem todas condições ambientais na região do parque eólico, o NPI foi calculado. Foi utilizado o L_{Aeq} do período de 12h50 até às 14h50 (sem nenhum ruído intrusivo) e o $L_{A90,10min}$ de todos os períodos diurnos em que o aerogerador estava desligado. O

resultado encontrado foi de 9 dB. Esse resultado mostra que a nova fonte de ruído pode ser considerada perceptível a notável pela comunidade local, podendo ainda ser esperada uma possível resposta adversa das pessoas ou até uma resposta adversa concreta, segundo os estudos de Hessler Jr. (2008).

É documentado que o incômodo causado pelo ruído das turbinas eólicas aumenta quando o nível sonoro também aumenta e a proximidade com os aerogeradores diminui; entretanto esse incômodo não é relacionado apenas ao ruído; sendo levado em consideração também a necessidade de fechar as janelas do quarto para dormir em razão do ruído das turbinas, vibrações e problemas no sono (MICHAUD et al., 2016).

4.2. Período noturno

No período noturno, representado na Figura 11, a situação é diferente para o $L_{Aeq,10min}$. O funcionamento dos aerogeradores faz com que os níveis de pressão sonora extrapolem o limite permitido pela NBR 10.151 em todos momentos, variando de 37,5 a 43,3 dB(A).

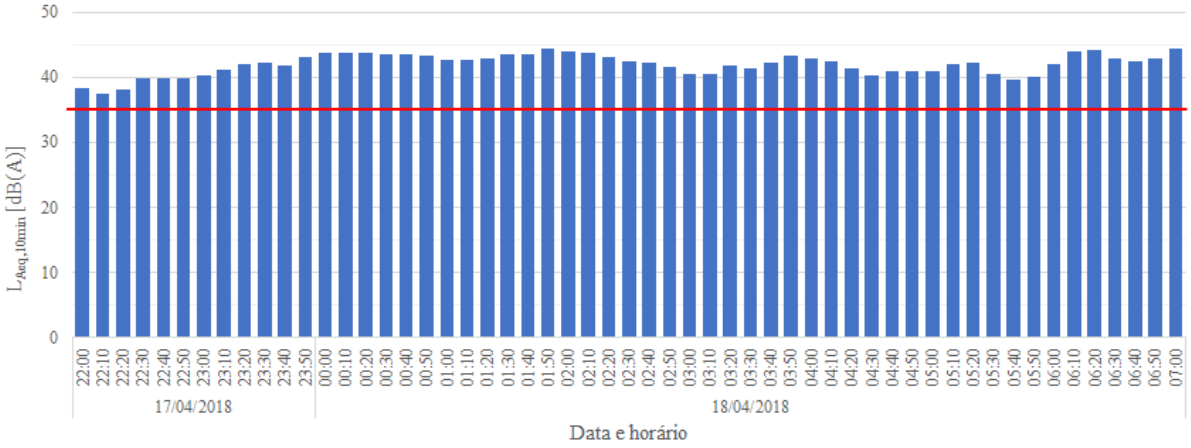


Figura 11: Valores medidos de $L_{Aeq,10min}$ no período noturno com os aerogeradores ligados e o limite estabelecido pela NBR10.151 para área de residências rurais.

Os valores de $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ durante a medição não mostraram nenhuma variação drástica e foram mais altos durante o início da madrugada (00h às 02h) e no final da medição (06h10 até 7h), como mostra a Figura 12.

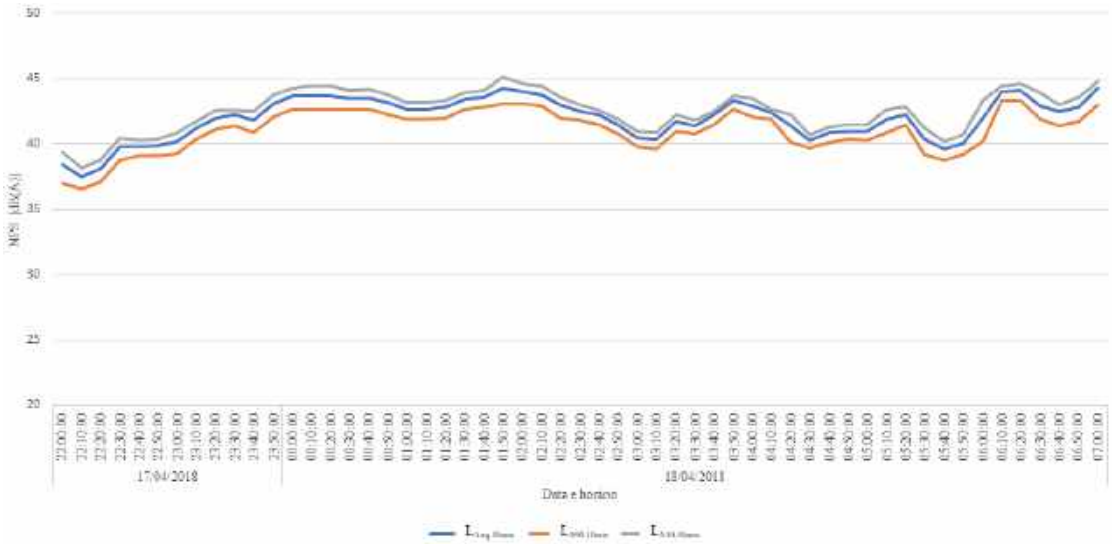


Figura 12: Relação entre $L_{Aeq,10min}$, $L_{A10,10min}$ e $L_{A90,10min}$ no período noturno com aerogeradores ligados.

O espectro da medição do período noturno (Figura 13) é similar ao espectro da medição diurna, ambos com o aerogerador ligado - os maiores valores de pressão sonora encontram-se nas médias frequências (de 315 a 1,6k Hz) - sobressaindo a frequência de 500Hz. Podemos destacar que a partir de 500 Hz, os valores diminuem à medida que a frequência aumenta até a frequência de 10kHz que sobe novamente.

Novamente foi impossível estabelecer uma relação entre a velocidade do vento média e os valores de $L_{Aeq,10min}$ medidos, visto a diferença expressiva entre os níveis de pressão sonora calculados e medidos.

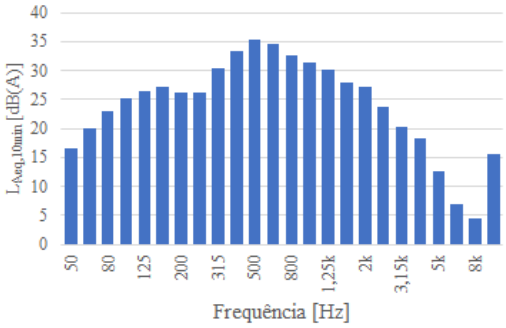


Figura 13: Espectro sonoro correspondente a medição no período noturno com os aerogeradores ligados.

5. CONCLUSÕES

A implantação de um parque eólico é um grande investimento e deve ser muito bem planejada. A análise das medições de nível de pressão sonora durante o período diurno mostra que o ruído proveniente do funcionamento do parque eólico é perceptível pela variação maior que 3 dB do nível de pressão sonora, entretanto está dentro do limite da norma.

Por outro lado, o nível de pressão sonora monitorado à noite com o funcionamento dos aerogeradores mostra-se inapropriado. Os valores encontrados variam entre 37,5 a 43,3 dB(A), sendo o valor máximo estabelecido pela NBR 10.151 de 35 dB(A), um limite justamente mais rigoroso por se tratar de um período de descanso e sono dos moradores da região. Mesmo sem a confirmação de que esse alto nível seja oriundo das turbinas e não seja característico do período noturno daquela área, ele pode trazer possíveis riscos à saúde das pessoas da comunidade.

Estudos futuros devem dar a continuidade a esse trabalho, sendo necessário avaliar durante mais tempo (dias, semanas), com e sem o funcionamento dos aerogeradores de vento, nos dois períodos (diurno e noturno). Utilizando um volume de dados maior será possível estabelecer relações entre o $L_{Aeq,10min}$ e a velocidade média do vento medidos para os diferentes períodos. Além disso, a gravação de áudio simultânea dos eventos possibilitará a exclusão dos ruídos intrusivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10151: Acústica - medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BOWDLER, R.; LEVENTHALL, G. **Wind turbine noise**. Essex, Reino Unido: Multi-Science Publishing Co Ltd, 2011. 215 p.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama. Resolução Conama Nº 462, de 24 de julho de 2014 - Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos de geração elétrica a partir de fonte eólica em superfície terrestre, e dá outras providências. Publicado no D.O.U. de 25 de julho de 2014. Disponível em <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=703> Acesso em: 30 mar. 2019.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2018: Relatório síntese, ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf> Acesso em 30 mar. 2019.

HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. **Wind farm noise: measurement, assessment and control.** Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2017. 605 p.

HESSLER, David. **Measuring and analyzing wind turbine noise**. In: BOWDLER, Dick; LEVENTHALL, Geoff (Ed.). Wind turbine noise. Essex, Reino Unido: Multi-science Publishing Co Ltd, 2011. Cap. 7. p. 153-187.

HESSLER, D. M., HESSLER, G. F. Recommended Noise Level Design Goals and Limits at Residential Receptors for Wind Turbine Developments in the United States. **Noise Control Engineering Journal,** v. 59 (1), 2011.

HESSLER, G.F.; HESSLER, D.M. Baseline Environmental Sound Levels for Wind Turbine Projects. **Sound and Vibration,** v.40 (11), 2006. Disponível em < http://sandvmag.com/downloads/0611hess.pdf.> Acesso em 30 mar. 2019.

HESSLER JR, G. The noise perception index (NPI) for assessing noise impact from major industrial facilities and power plants in the US. **Noise Control Engineering Journal,** v. 56(5), p. 374–385, 2008.

HUNT M.; HANNAH, L. 2009. The use of Noise Perception Index (NPI) for setting wind farm noise limits. In: *Third International Meeting on Wind Turbine Noise*, Aalborg, Denmark.

KNOPPER, L. D.; OLLSON, C. A. Health effects and Wind turbines: a review of the literature. **Environmental health,** v. 10(78). 2011.

LUZ, E. P. **Simulação do ruído de aerogeradores em parques eólicos**. 2018. 139 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MICHAUD, D. S. *et al.* Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 139, p. 1455–1466, 2016.

WHO – World Health Organization. Environmental noise guidelines for the European region. 2018. Disponível em <http://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018> Acesso em 30 mar. 2019.