

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Simulação aeroacústica de pás de turbinas eólicas de
eixo horizontal com bordo de fuga modificado para
redução de ruído**

Julio Sampaio Gabriel de Pieri

São Paulo
2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Simulação aeroacústica de pás de turbinas eólicas de
eixo horizontal com bordo de fuga modificado para
redução de ruído**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Julio Sampaio Gabriel de Pieri

Orientador: Prof. Dr. Bruno Souza Carmo

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

São Paulo

2017

Catalogação-na-publicação

Pieri, Julio Sampaio Gabriel de

Simulação aeroacústica de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal com
bordo de fuga modificado para redução de ruído / J. S. G. Pieri -- São Paulo,
2017.

74 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Energia Eólica 2.CFD 3.Aeroacústica 4.Sustentabilidade 5.Redução de
Ruído I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

A energia eólica é vista atualmente como uma alternativa importante na busca pelo uso de energias renováveis. Além das dificuldades tecnológicas, um grande desafio que precisa ser superado é a aceitação por parte do público. Dentre diversos problemas como impacto visual, uso da terra e morte da fauna, uma questão importante é o incomodo provocado pelo ruído aerodinâmico do aerogerador. Pretende-se com esse projeto obter um modelo em CFD (*Computer Fluid Dynamics*) de uma turbina eólica de eixo horizontal para se avaliar o ruído aerodinâmico produzido no escoamento através das pás utilizadas. Além disso, espera-se propor e simular modificações na geometria das pás, particularmente no bordo de fuga, procurando reduzir o ruído em frequências que afetam a população e animais ao redor da turbina. Por fim, varia-se alguns parâmetros geométricos de um bordo de fuga serrilhado, buscando identificar a contribuição isolada de cada um na produção de ruído.

Palavras-chave: *Energia Eólica. CFD. Aeroacústica. Sustentabilidade. Redução de Ruído*

ABSTRACT

Wind energy is seen today as a key alternative in the seek for renewable energy usage. Besides the technological difficulties, one of the biggest challenges that needs to be overcome is the public acceptance. Among the problems, as visual impact, use of land and fauna killing, one major issue is the disturbance generated by the aerodynamic noise. The intention with this work is to obtain a CFD (*Computer Fluid Dynamics*) model of an horizontal axis wind turbine to assess the noise generated by the flow through the blades. Also, it is intended to simulate modifications in the blade geometry, particularly in the trailing edge, aiming to reduce the noise at frequencies that affect the people and animals around the turbines. Lastly, the impact on noise reduction of the geometric parameters of a serrated trailing edge is assessed.

Keywords: *Wind Energy. CFD. Aeroacoustics. Sustainability. Noise Reduction*

Lista de ilustrações

Figura 1 – (a) Média global da anomalia de temperatura combinada da terra e do mar. Cores indicam diferentes conjuntos de dados (b) Média global da concentração de gases de efeito estufa (extraído de [1], traduzido e editado)	1
Figura 2 – Geração e capacidade de fontes renováveis como parcela global, 2007-2015 % (extraído de [6] e traduzido)	3
Figura 3 – Capacidade cumulativa global instalada de energia eólica 2000-2015 (extraído de [9])	4
Figura 4 – Bordo de fuga serrilhado de uma pá eólica (extraído de [21]) . . .	6
Figura 5 – Diagrama esquemático da montagem do experimento, extraído de [34] e traduzido	15
Figura 6 – Malha 2D utilizada nessa etapa	16
Figura 7 – Diferentes superfícies consideradas como emissoras de ruído . . .	21
Figura 8 – Domínio da simulação e detalhe da ponta da pá	23
Figura 9 – Detalhe da malha. À esquerda a malha inicial, e à direita a refinada	24
Figura 10 – Vista superior da posição padrão dos microfones, adaptado e traduzido de [42]	25
Figura 11 – Detalhe da geometria de serrilhado criada	27
Figura 12 – Detalhe da geometria de serrilhado com amplitude 50% maior . .	28
Figura 13 – Detalhe da geometria de serrilhado com amplitude 50% menor .	28
Figura 14 – Detalhe da geometria de serrilhado com o dobro de comprimento de onda	29
Figura 15 – Detalhe da geometria de serrilhado com o triplo de comprimento de onda	29
Figura 16 – Densidade Espectral vs Frequência para $\alpha = 1,58^\circ$. Em azul, a medição com o aerofólio na seção de testes; em verde, a do ruído de fundo. Extraído de [34] e traduzido	30
Figura 17 – Densidade Espectral vs Frequência para $\alpha = 3,16^\circ$. Em azul, a medição com o aerofólio na seção de testes; em verde, a do ruído de fundo. Extraído de [34] e traduzido	31
Figura 18 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para quatro diferentes comprimentos de correlação	32
Figura 19 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para três diferentes tempos de simulação	34

Figura 20 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para diferentes ordens de discretização e tempos de simulação	35
Figura 21 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para dois esquemas de avanço temporal	36
Figura 22 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com e sem chanfro	37
Figura 23 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para dois ângulos de ataque diferentes	38
Figura 24 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para três graus de refino de malha diferentes	39
Figura 25 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com diferentes modelos/abordagens de turbulência para caso 2D	41
Figura 26 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência de ruído proveniente de cada trecho do aerofólio 2D	42
Figura 27 – Cotornos de intensidade de turbulência próximos a superfície do aerofólio. As setas indicam ponto aproximado da quebra (virtual) das superfícies	43
Figura 28 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com diferentes modelos/abordagens de turbulência para caso 3D	44
Figura 29 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 1, conforme figura 10	45
Figura 30 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 2, conforme figura 10	46
Figura 31 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 3, conforme figura 10	47
Figura 32 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 4, conforme figura 10	48
Figura 33 – Comparação de SPL vs frequência entre os casos refinado e não refinado para a pá modificada inicial	50
Figura 34 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com metade de amplitude de serrilhado	51

Figura 35 – Comparaçao de SPL vs frequênci entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de amplitude de serrilhado	52
Figura 36 – Comparaçao de SPL vs frequênci entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de comprimento de onda do ser- rilhado, avaliado no microfone 2	53
Figura 37 – Comparaçao de SPL vs frequênci entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com triplo de comprimento de onda do serri- lhado, avaliado no microfone 2	54
Figura 38 – Comparaçao de SPL vs frequênci entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de comprimento de onda do ser- rilhado, avaliado no microfone 3	55
Figura 39 – Comparaçao de SPL vs frequênci entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com triplo de comprimento de onda do serri- lhado, avaliado no microfone 3	56

Sumário

RESUMO	I	
ABSTRACT	II	
LISTA DE FIGURAS	V	
1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto da energia eólica dentre as fontes renováveis	1
1.2	Controle de ruído em turbinas eólicas	5
2	OBJETIVOS	7
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
3.1	Características do Som	8
3.2	Equação de Onda	8
3.3	Espectro Sonoro e Transformada de Fourier	9
3.4	Método de abordagem do problema	10
3.5	Escolha do software de simulação numérica	11
3.6	Aeroacústica	12
3.7	Aeroacústica no Fluent	12
3.7.1	Cálculo Direto (Computational Aeroacoustics) ou CAA	13
3.7.2	Modelagem de analogia acústica de Lighthill	13
4	METODOLOGIA	14
4.1	Avaliação de ruído em geometria 2D de aerofólio	14
4.1.1	Configuração comum	15
4.1.2	Análise de sensibilidade	18
4.2	Avaliação de ruído em geometria 3D de aerofólio	21
4.3	Simulação de geometria de pá de turbina eólica convencional	22
4.3.1	Domínio da simulação	22
4.3.2	Condições da simulação	23
4.3.3	Turbulência e Malha	24
4.3.4	Posição do microfone	24
4.4	Simulação de geometria de pá de turbina eólica com bordo de fuga modificado	26
4.4.1	Características do serrilhado e da simulação	26
4.4.2	Variação dos parâmetros do serrilhado	27

5	RESULTADOS	30
5.1	Aerofólio 2D	30
5.1.1	Comprimento de correlação	32
5.1.2	Número de passos e tamanho do passo temporal	33
5.1.3	Ordem de discretização temporal	35
5.1.4	Esquema de avanço temporal	36
5.1.5	Chanfro no bordo de fuga	37
5.1.6	Ângulo de ataque	38
5.1.7	Refino da malha e $y+$	39
5.1.8	Abordagem de turbulência	40
5.1.9	Separação da superfície do aerofólio	42
5.2	Aerofólio 3D	43
5.3	Pá de turbina eólica	45
5.3.1	Resultado comparativo entre os microfones	45
5.3.2	Estudo de refino de malhas	49
5.3.3	Estudo de variação de amplitude do serrilhado	51
5.3.4	Estudo de variação de comprimento de onda do serrilhado	53
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da energia eólica dentre as fontes renováveis

As emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , Metano e NO_x) cresceram desde a era pré-industrial, levando a concentrações sem precedentes desses gases na atmosfera em pelo menos 800.000 anos [1]. Ademais, na primeira década do século XXI as emissões de CO_2 devidas à queima de combustíveis fósseis e atividades industriais somaram 78% das emissões de todos os gases de efeito estufa. Mais surpreendente ainda, 66% de toda a geração de energia elétrica mundial de 2013 e de 2014 foi a partir de queima de combustíveis fósseis (gás, carvão e óleo) [2, 3]. Concomitante às emissões crescentes, observa-se também um aumento significativo na temperatura média do planeta desde a segunda metade do século XX, sugerindo uma forte correlação entre esses dois fatos [1], como mostra a Figura 1. Aumentos aparentemente pequenos da temperatura média global já trazem consequências fortes ao equilíbrio dos diversos ecossistemas do planeta, o que afeta de forma direta e indireta a vida humana.

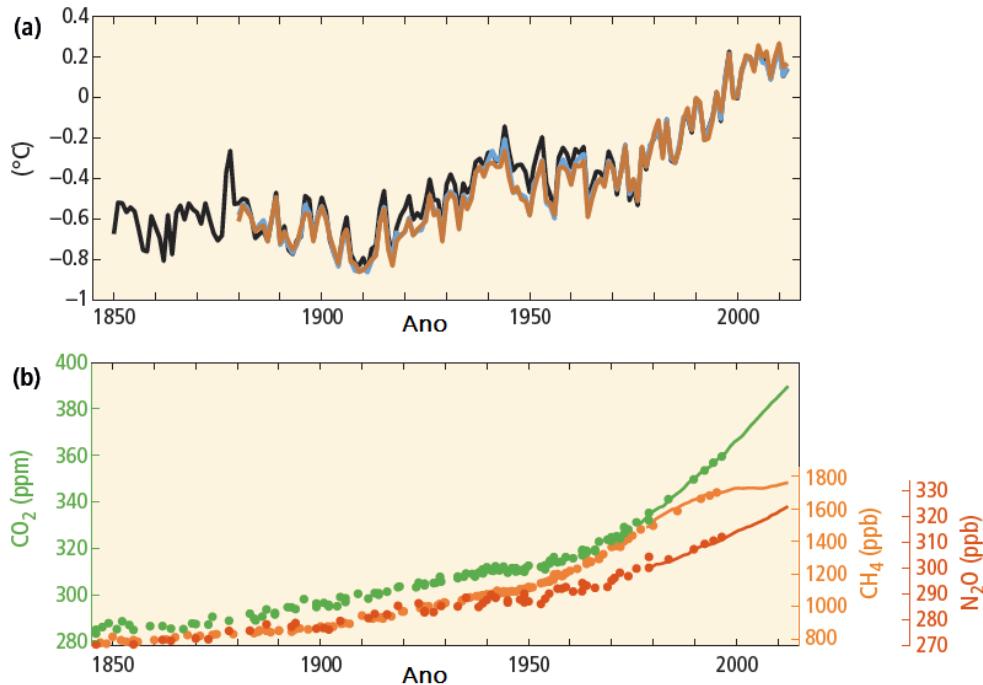


Figura 1 – (a) Média global da anomalia de temperatura combinada da terra e do mar. Cores indicam diferentes conjuntos de dados (b) Média global da concentração de gases de efeito estufa (extraído de [1], traduzido e editado)

Segundo [Hare\[4\]](#), aumento de “apenas” $1,5 - 2^{\circ}C$ na temperatura média global, como o esperado de se observar antes de 2020, pode prejudicar a produção de grãos, aumentar o estresse hídrico em regiões como Ásia, África e América Latina e elevar o nível dos oceanos. Além disso, aumenta a probabilidade de ocorrência de eventos extremos como enchentes, ondas de calor, secas, tempestades e põe em risco de extinção 10 – 15% das espécies. Todos esses efeitos indicam uma severa perturbação no equilíbrio climático do planeta, trazendo riscos de fome, saúde, alagamento e escassez de água a milhões de pessoas [\[5\]](#).

Dentro desse cenário preocupante, diversas iniciativas de contenção de emissões são discutidas. Na área de geração de eletricidade, há a necessidade de se mudar o paradigma da matriz energética global, buscando alternativas aos métodos tradicionais, que envolvem queima de combustíveis fósseis. Nesse contexto, teve-se em 2015 um cenário otimista que mostrou que investimentos em energias renováveis cresceram 515% entre 2004 e 2015, culminando em US\$285,9 bilhões no ano de 2015. Essa tendência de investimento crescente em fontes renováveis também é observada em países em desenvolvimento, cujos valores superaram inclusive os investimentos nos países desenvolvidos. Além disso, pela primeira vez na história, a capacidade instalada durante um ano proveniente de fontes renováveis (com exceção das grandes hidrelétricas) superou a de outras fontes, totalizando 53,6% (134GW) dos gigawatts instalados no mundo em 2015, como mostra a Figura 2. Dentro desse total, as instalações eólicas contribuíram com 62GW, um aumento de 26,5% em relação à 2014 [\[6\]](#).

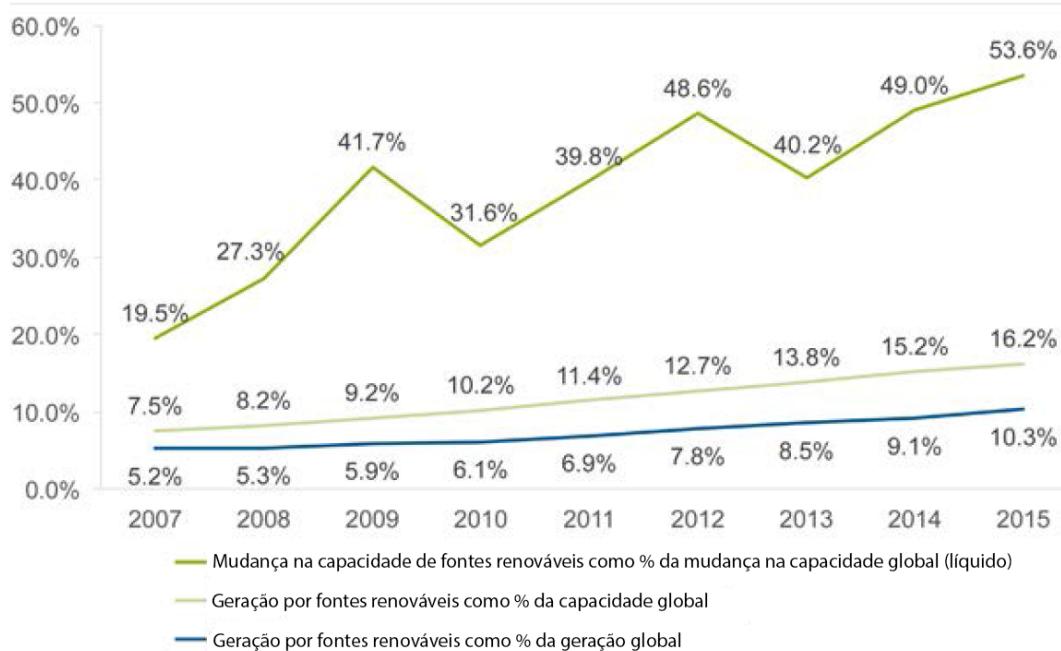


Figura 2 – Geração e capacidade de fontes renováveis como parcela global, 2007-2015 % (extraído de [6] e traduzido)

Dados sugerem um futuro promissor para a energia eólica. Segundo Ahmed e Cameron[7], o custo da energia eólica tem caído rapidamente conforme a capacidade e a tecnologia das turbinas aumentam, tornando essa fonte competitiva frente aos setores convencionais de geração de eletricidade. Junto a isso, vê-se um crescimento acelerado da capacidade global instalada deste tipo de energia (Figura 3). Espera-se que em 2035 a eólica seja responsável por um quarto de toda geração de energia de fontes renováveis, ficando atrás apenas de hidroelétricas com 50% dessa geração. Nesse mesmo ano, as fontes renováveis devem responder por quase um terço da geração de eletricidade [8], o que representa triplicar essa fatia em relação 2015, quando a parcela atingiu 10,3% mostrado na figura 2.

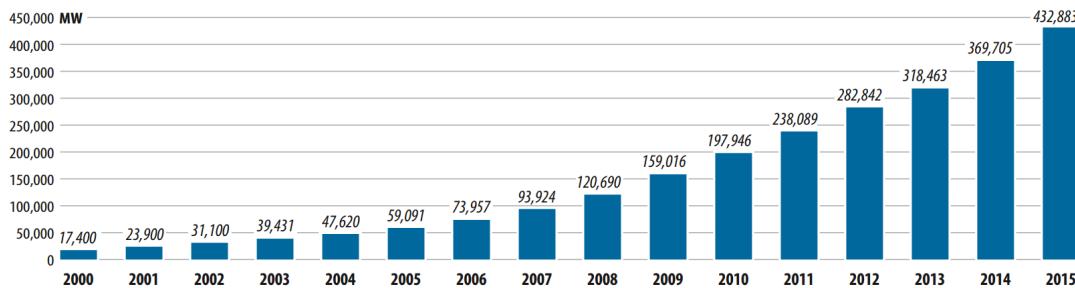


Figura 3 – Capacidade cumulativa global instalada de energia eólica 2000-2015 (extraído de [9])

A dificuldade de aceitação social é particular de turbinas *onshore*, instalações eólicas em terra firme, que são o suporte principal da indústria desse tipo de energia (mais de 95% de toda capacidade instalada global é *onshore* [9]). Aspectos como o efeito de sombra (conhecido como *flickering shadows*), o grande porte das torres e o consequente impacto estético na paisagem são desafios importantes enfrentados por esta tecnologia, mas que geralmente podem ser minimizados com um estudo cuidadoso do sítio onde se deseja instalar o parque eólico [7].

Um outro grande problema pertinente à questão de aceitação social de turbinas eólicas é o ruído oriundo de seu funcionamento [7, 10, 11, 12]. Como fator agravante, turbinas *onshore* são geralmente construídas próximas a regiões habitadas, o que não só torna a questão de poluição sonora ainda mais delicada, como também a existência de construções e árvores tornam o vento mais turbulento, agravando a geração de ruído [13].

Os efeitos do ruído na saúde da população ao redor de instalações eólicas são amplamente discutidos por Berg[14]. Dentre as principais consequências estão irritação e distúrbios no sono, mas o nível de incômodo parece ser subjetivo, dificultando sua quantificação e atuação sobre o problema [14, 11]. Independentemente, tal questão ainda dificulta a ampla disseminação de turbinas eólicas *onshore*, principalmente nas redondezas de zonas habitadas [10].

O ruído de turbinas eólicas em geral é dividido em mecânico e aerodinâmico. Contudo, há um consenso de que o ruído mecânico, principalmente proveniente da caixa de engrenagens, já não é mais uma fonte relevante em turbinas modernas graças ao melhor isolamento sonoro e engrenagens mais silenciosas [14, 10, 12, 11]. A origem principal do ruído em turbinas eólicas atualmente é, portanto, aerodinâmica, nomeadamente ruído de baixa frequência, som de *inflow* turbulento e auto-ruído de aerofólio [11]. Dentre estas, Oerlemans, Sijtsma e Méndez López[10] dizem que a principal fonte ainda é incerta, entretanto sugerem, junto com Rogers, Manwell e Wright[11],

que o ruído de bordo de fuga, um tipo de auto-ruído de aerofólio, é relevante.

1.2 Controle de ruído em turbinas eólicas

Como discutido, a aceitação das turbinas eólicas por parte da população é um fator limitante na disseminação dessa fonte de energia. Dentre os problemas, o ruído gerado é particularmente relevante e seu controle pode ser realizado de maneiras distintas.

[Berg](#)[14] levanta diferentes possibilidades para abordar o problema de poluição sonora de turbinas eólicas. Duas medidas básicas são claras: aumentar a distância entre indivíduo e a turbina, e reduzir a velocidade das pás, e devem sempre ser as primeiras atitudes a serem consideradas. Além disso, sincronizar as turbinas para evitar interferência construtiva das fontes de ruído tem sido empregado por alguns fabricantes. O autor ainda sugere que por se tratar de algo subjetivo, medidas para reduzir ruído aplicadas durante a noite trazem resultados mais satisfatórios do que as aplicadas durante o dia.

Uma outra abordagem frequentemente discutida são modificações passivas nas pás, particularmente alterando-se a geometria do bordo de fuga delas. Uma das modificações mais frequentemente encontradas na literatura é a de bordo de fuga serrilhado, com diversos experimentos realizados em aerofólio e placas planas ([15], [16], [17]). Os trabalhos de [Barone](#)[18] e [Avallone, Probsting e Ragni](#)[19] apontam que essa modificação é das mais promissoras, citando diversos experimentos que sugerem uma redução significativa de ruído. A redução é particularmente observada em baixas frequências, sendo que ruídos nessa banda são uma causa importante de irritação na população ao redor das turbinas [20]. Por outro lado, [Doolan, Moreau e Brooks](#)[12] e [Gruber](#)[17] reforçam que por mais que seja uma modificação importante, sua real redução de ruído é consideravelmente inferior à predita na teoria.

Bordos de fuga serrilhado já são comercialmente empregados, como no caso do DinoTails® da Siemens. [Oerlemans e Fuglsang](#)[21] sugerem ainda que a essa modificação pode aumentar a extração de energia da turbina. A figura 4 mostra uma pá de turbina com bordo de fuga serrilhado.



Figura 4 – Bordo de fuga serrilhado de uma pá eólica (extraído de [21])

Há ainda outras modificações discutidas na literatura. O uso de bordo de fuga poroso é tido como promissor, mas limitado devido ao acúmulo de sujeira, exigindo manutenções caras e frequentes [12], [22]. Além disso, os resultados experimentais obtidos em aerofólios não apontam redução de ruído evidente [23] e os experimentos em turbinas eólicas são infrequentes e inconclusivos [18].

Também discute-se o uso de cerdas, que aliviariam a descontinuidade abrupta do bordo de fuga e consequentemente reduzindo o ruído [7]. Alguns experimentos trouxeram bons resultados, porém o mesmo problema de acúmulo de sujeira está presente nessa modificação [22].

De um modo geral, autores apontam para a falta de modelos computacionais sobre o assunto [7], bem como a necessidade de investigações mais profundas [18] para auxiliar no projeto de modificações geométricas para reduzir o ruído.

Obs: Este tópico trata-se de uma revisão bibliográfica preliminar. Espera-se ainda citar trabalhos que tratam de geometrias bioinspiradas.

2 OBJETIVOS

Como descrito até aqui, o ruído de bordo de fuga é tido na literatura como uma fonte importante de poluição sonora produzida por turbinas eólicas. Assim, o objetivo deste trabalho é simular, por meio de uma ferramenta de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o escoamento através de uma turbina eólica de eixo horizontal com bordo de fuga modificado e avaliar a sua geração de ruído aerodinâmico. Pretende-se inicialmente simular uma geometria típica de pá de rotor eólico *onshore* usado para geração de eletricidade, levantando o ruído produzido.

Em seguida, uma geometria com bordo de fuga serrilhado será simulada nas mesmas condições anteriores, juntamente com outras com variações no comprimento de onda e na amplitude da serrilhado. Com os resultados, pretende-se comprovar o uso de CFD para essa aplicação, além de comparar o efeito de redução das diferentes geometrias utilizadas, em busca da configuração mais eficaz.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Características do Som

Som é uma perturbação de pressão propagada em ondas que, ao atingirem nossos tímpanos fazem com que vibrem permitindo que escutemos o som. A faixa frequência audível é de $20Hz$ a $20.000Hz$, sendo que o ouvido humano é mais sensível entre $1kHz$ e $5kHz$ [24].

A potência de um som envolve uma faixa muito grande de valores, que vai desde um cochicho com $10^{-10}W$ até, por exemplo, o lançamento de um foguete que produz 10^7W de potência. Dada essa característica dos valores, costuma-se empregar uma escala logarítmica para quantificar o ruído [24].

Quando uma onda de pressão (ruído) passa em uma região, ela desvia as partículas ali presentes de seu estado de equilíbrio. Baseado nessas flutuações, mede-se o ruído em uma grandeza chamada de Nível de Pressão Sonora (*Sound Pressure Level*, referido neste trabalho como SPL), definida segundo:

$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p'_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (3.1)$$

Na qual p'_{rms} é a média quadrática das flutuações de pressão e p_{ref} , uma pressão de referência, quase sempre utilizada como $2 \cdot 10^{-5}Pa$.

O ouvido não responde de forma igual a todos os estímulos sonoros. Ruídos de intensidades iguais, porém em frequências distintas causam sensações diferentes de volume. Essa sensação subjetiva de intensidade sonora, conhecida como *loudness*, faz com que dependendo da frequência, o incômodo ocasionado pelo ruído varie [24].

3.2 Equação de Onda

Os detalhes da dedução da equação de onda fogem do escopo deste trabalho, portanto apresenta-se aqui apenas uma breve descrição do processo de derivação e o resultado final, baseando o processo conforme o apresentado em [24].

Inicialmente, assume-se que a pressão é função apenas da densidade, $p = p(\rho)$. Expandindo essa relação em Taylor e tomando apenas o termo de primeira ordem, chega-se em:

$$(p - p_0) = (\rho - \rho_0) \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) \quad (3.2)$$

A partir disso, define-se uma nova variável c^2 :

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho}(\rho_0) \quad (3.3)$$

Notando que $(p - p_o)$ e $(\rho - \rho_0)$ são as flutuações de pressão, p' , e de densidade, ρ' , respectivamente, a relação 3.2 pode ser reescrita como:

$$p' = c^2 \rho' \quad (3.4)$$

Partindo-se agora de um volume de controle e aplicando-se conservação de massa e momento, pode-se obter, após uma série de manipulações algébricas, a seguinte relação diferencial:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} = 0 \quad (3.5)$$

Por fim, substitui-se ρ' pela relação 3.4 e obtém a equação de onda unidimensional, viajando a uma velocidade c :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} = 0 \quad (3.6)$$

Essa equação é similar a uma equação de propagação de onda eletromagnética. Com base na solução geral dessa equação diferencial, define-se c como a *velocidade de propagação do som*.

Analogamente, em 3D a equação de onda é:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = 0 \quad (3.7)$$

3.3 Espectro Sonoro e Transformada de Fourier

Como descrito anteriormente, a sensibilidade do ouvido humano não é constante para todas as frequências, e dependendo do tom do ruído o incômodo gerado pode ser maior ou menor. É interessante, portanto, decompor o sinal sonoro em faixas de frequências para estudá-lo. Isso é conhecido como análise espectral.

O som é um sinal que varia com tempo e com posição. Dessa forma, para obter sua composição tonal, ou seja, sua distribuição em frequências, aplica-se a Transformada de Fourier no sinal medido/calculado no tempo. O teorema de Fourier afirma que uma função no tempo $f(t)$ pode ser escrita como a integral de seus componentes harmônicos. Analogamente, a intensidade de cada um desses componentes harmônicos pode ser escrita como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.8)$$

No caso deste trabalho, a função $f(t)$ é a perturbação de pressão obtida computacionalmente. Se essa variação de pressão for uma senoide pura, por exemplo, a transformada de Fourier resultará em uma função impulso na frequência de oscilação da senoide. Contudo, um som real é, em geral, uma composição de diversos tons (harmônicos), contendo picos nas frequências cujas intensidades são maiores.

Além do SPL, outras duas grandezas são importantes de serem mencionadas. Uma é o Nível de Espectro de Pressão (*Pressure Spectrum Level*, referido neste trabalho como *PSL*), que é o SPL contido em uma faixa de frequência de largura de 1Hz , e outra é o Nível de Pressão de Banda (*Pressure Band Level*, referido como *PBL*), que é o SPL em uma banda de largura Δf [25]. A partir dessas grandezas, pode-se obter uma média do SPL dividindo-se o PBL (ou PSL) pelo tamanho da respectiva faixa de frequências, o que em decibéis significa subtrair $10\log_{10}(\Delta f)$ do PBL. Se essa largura da banda for pequena o suficiente de modo que o espectro de pressão seja aproximadamente contido na faixa, a referida média de SPL se aproxima do PSL (em dB/Hz) na frequência central da banda. Assim, pode-se escrever:

$$\overline{\text{SPL}} = \text{PSL} = \text{PBL} - 10\log_{10}(\Delta f) \quad (3.9)$$

Dados experimentais de ruído são geralmente expressos em termos do espectro de pressão, ou seja, mede-se o PBL em cada banda de frequência e aplica-se a relação 3.9. O resultado é então apresentado como uma curva do PSL pela frequência central da faixa. É fundamental, portanto, que se informe qual a largura de banda utilizada, pois o PSL apresentado é uma média sobre essa faixa [24]. Lembrando que para faixas pequenas, o PSL é numericamente equivalente à média do SPL sobre aquela faixa, de modo que, em última análise, uma curva de PSL apresentada é equivalente a uma de SPL.

3.4 Método de abordagem do problema

São três os possíveis métodos de solução de problemas em engenharia, durante a etapa conceitual de um projeto [26]:

- Analítico, o qual trabalha com uma representação matemática do fenômeno real. Traz limitações naturais decorrentes das hipóteses simplificadoras necessárias para tornar a resolução viável.
- Experimental, que, apesar de trazer dados valiosos e fiéis, exigiria nesse caso um túnel de vento com seção de testes anecoica que comportasse um modelo de turbina eólica, além de métodos de fabricação das diversas geometrias utilizadas.

- Computacional, que, apesar de também possuir simplificações e erros envolvidos, mostra-se muito flexível, por permitir estudar escoamentos complexos e variar a geometria testada com extrema facilidade.

O uso de CFD mostra-se extremamente vantajoso quando comparado com as outras opções de abordagem. Como a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo não dispõe de túnel de vento com seção de testes anecoica capaz de comportar um modelo de turbina eólica, a abordagem experimental não é a mais indicada. O método analítico também não é adequado por exigir muitas simplificações para torná-lo exequível. Por sua vez, o método computacional é extremamente flexível, permitindo simular escoamentos de difícil modelagem, como o através de uma turbina eólica. Além disso, com este método é simples de se testar geometrias diferentes, tornando-o ainda mais adequado a este trabalho, cujo objetivo justamente envolve testes em geometrias diversas.

3.5 Escolha do software de simulação numérica

Partindo-se da escolha pela abordagem computacional, resta ainda escolher a ferramenta de CFD a ser utilizada. Dentre as inúmeras opções no mercado, duas se destacaram por motivos diferentes:

- ANSYS Fluent

Ferramenta relativamente fácil de usar e com grande renome, sendo o maior código comercial de CFD do mercado em 2014 [27]. Além disso, o autor deste trabalho já possui conhecimento prévio no uso deste programa, o que reduziria o tempo gasto em etapas de aprendizado.

- Exa PowerFLOW

Utiliza o método de Lattice-Boltzmann ao invés do convencional Navier-Stokes, o que facilita em termos computacionais simulações de escoamentos transientes, complexos e com geometrias elaboradas [28]. Possui uma ferramenta de pós processamento especializada em acústica, e é utilizado por empresas grandes para avaliar especificamente o ruído. Permite ainda comparar em um mesmo relatório de resultados como modificações geométricas impactam o ruído [29]. Entretanto esse programa possui menos influência no mercado que o Fluent [27] e seria necessário aprendizado desde o básico por parte do autor deste trabalho.

Como escolha inicial, optou-se por utilizar o PowerFLOW, em particular por dispor de maneiras flexíveis de se testar variações geométricas [29]. Além disso, este software se mostrou mais eficiente do que o Fluent para estudos de aeroacústica realizados

anteriormente no NDF, dentro do projeto de Aeronave Silenciosa (FAPESP/Embraer). Entretanto, trata-se de uma ferramenta pouco intuitiva e muito deficitária em material de ajuda. O portal da *ExaCORP*. possui vídeos prolixos, pouco claros e difíceis de acompanhar. Dessa forma, o aprendizado nesse software tomaria muito tempo e possivelmente não seria consistente o suficiente para elaborar uma tese sólida.

Assim, optou-se pelo ANSYS Fluent como ferramenta de CFD desse trabalho. O autor já possui conhecimento em como utilizar este programa, o que contribuirá para o andamento do projeto. Além disso, a ANSYS dispõe de inúmeras referências e tutoriais para aprendizado no Fluent, o que não acontece satisfatoriamente no caso da software da *ExaCORP*. Há também diversos grupos de ajuda em fóruns pela internet, o que também não existe com o PowerFLOW.

3.6 Aeroacústica

Dentro da área de acústica há dois ramos diferentes de estudo, a aeroacústica e vibrações (ou vibroacústica). Enquanto vibrações estuda o ruído gerado em estruturas, a aeroacústica analisa som gerado por escoamentos [30]. Em aeroacústica, há ainda uma distinção entre som gerado em escoamento livre sem a presença de superfícies sólidas (som gerado por turbulência e por jato de fluido), com a presença de superfícies sólidas (ruído de ventilador, turbinas, camada limite e cavidades) e em escoamentos internos (ruído em tubulações) [31].

A aeroacústica possui diversas características que tornam a análise computacional desafiadora. Dentre elas, pode-se listar [31]:

- Aeroacústica é intrinsecamente transitória, exigindo precisão ao se avaliar a progressão temporal do escoamento;
- A ordem de grandeza da energia e da pressão contida em ondas acústicas é muito menor que a do escoamento;
- A faixa de frequências de interesse (20Hz até 20kHz) exige uma resolução temporal muito maior que a da dinâmica do escoamento;
- Necessidade de se capturar pequenos vórtices, exigindo grande resolução espacial.

3.7 Aeroacústica no Fluent

Diversas são as possíveis abordagens de aeroacústica em CFD [32]. Particularmente, o ANSYS Fluent dispõe de três abordagens distintas para se avaliar ruído, cada

uma com suas vantagens, desvantagens e exigência computacional. Cada modelo é mais indicado para um cenário diferente, e a seguir apresenta-se duas dessas abordagens [31]:

3.7.1 Cálculo Direto (Computational Aeroacoustics) ou CAA

No cálculo direto, calculam-se as flutuações de pressão como parte das equações resolvidas. Essa abordagem permite que se contabilize efeitos físicos como ressonância e reflexão, porém exige altíssimo grau de refino de malha para comportar a ordem de grandeza das ondas. Isso faz com que, em 3D, esse método seja viável apenas para domínios pequenos. Para escoamentos externos de grande porte, portanto, torna-se impraticável.

3.7.2 Modelagem de analogia acústica de Lighthill

A analogia acústica oferece uma alternativa viável ao cálculo direto, na medida em que resolve o campo do emissor apenas em um domínio reduzido do problema. Nessa “região emissora”, o escoamento é solucionado com as devidas equações governantes e, a partir da solução analítica da equação de onda, propaga-se o som até o receptor. Desse modo, desacopla-se a geração do ruído de sua propagação, reduzindo severamente o grau de refino de malha necessário na zona de propagação da onda.

Método de Ffowcs Williams-Hawkins

O método de Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H) oferece uma forma generalizada da analogia acústica de Lighthill e é capaz de avaliar o ruído gerado por interação entre escoamento e superfícies sólidas, sendo amplamente empregado para análise de ruído em rotores. Enquanto na analogia de Lighthill o fluido era assumido como sem fronteira, na abordagem de FW-H leva-se em conta efeitos de fronteiras móveis utilizando as fontes equivalentes de Huygens (monópolo, dipolo e quadrupolo) [33].

É importante que se obtenha uma solução precisa no tempo das variáveis do escoamento. Desse modo, recomenda-se utilizar modelos URANS, LES ou híbridos RANS-LES para capturar satisfatoriamente tais variáveis. Como limitação, esse modelo só permite avaliar ruído em espaços abertos, não sendo possível contabilizar efeitos como reflexão e difração de ondas. Desse modo, não se deve utilizar o FW-H para escoamentos confinados [31].

4 METODOLOGIA

Partindo-se da ferramenta numérica escolhida, ainda é necessário definir uma estratégia de abordagem do problema. Para atingir o objetivo final de se simular uma pá de turbina eólica com bordo de fuga modificado, decidiu-se simular uma série de outras geometrias mais simples, incrementando gradativamente a dificuldade do problema. Essas geometrias intermediárias são: aerofólio 2D, aerofólio 3D, pá de turbina convencional e pá de turbina modificada. Com isso o caminho rumo ao problema final torna-se mais claro, facilitando a compreensão e análise dos resultados finais.

Em paralelo, deve-se verificar e validar cada resultado parcial obtido, procurando garantir que o modelo empregado é fiel à realidade, além de trazer confiança de que se está utilizando corretamente o *software* e os conceitos de acústica. Em particular para a validação dos resultados, utilizou-se como referência alguns artigos de acordo com a geometria utilizada na respectiva etapa.

4.1 Avaliação de ruído em geometria 2D de aerofólio

Para validação dos resultados dessas simulações iniciais de aerofólio 2D (e futuramente 3D), tomou-se como base alguns dos resultados apresentados na publicação de [Arcondoulis, Doolan e Zander\[34\]](#). A geometria e disposição utilizada nesta etapa será a mesma da referência: aerofólio NACA0012 com 67mm de corda. A posição do microfone é de 112mm a jusante do bordo de ataque, e a 650mm acima da linha de centro do aerofólio.

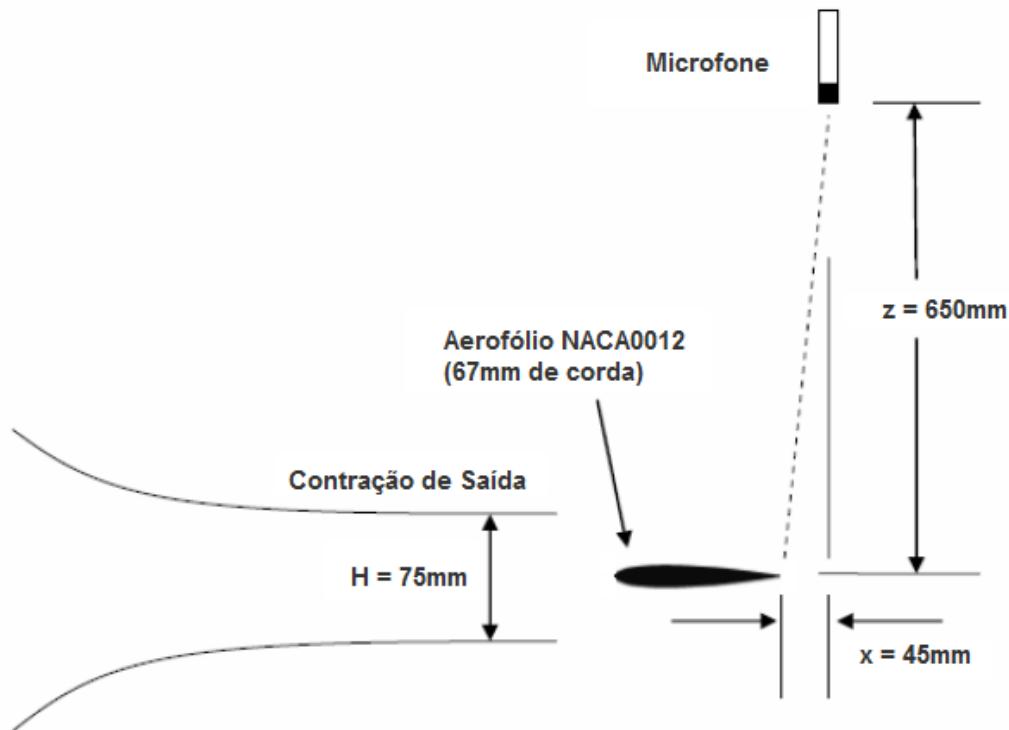


Figura 5 – Diagrama esquemático da montagem do experimento, extraído de [34] e traduzido

Nessa etapa, realizaram-se diversas simulações alterando-se alguns parâmetros e procurando analisar seus impactos na geração de ruído. Um descrição de cada teste realizado é apresentada no item 4.1.2: [Análise de sensibilidade](#). Os resultados são posteriormente apresentados no item 5.

Há também uma configuração básica comum a todas as simulações, conforme apresentado no item a seguir.

4.1.1 Configuração comum

Malha

Seguindo as práticas recomendadas no manual do usuário do Fluent [35], utilizou-se uma malha estruturada composta apenas por elementos quadrilaterais. Além disso, refinou-se bastante a malha próximo a superfície do aerofólio procurando capturar efeitos de camada limite, e a jusante da geometria, para capturar o efeito da esteira. O índice de qualidade de malha "assimetria" (ou *Skewness*) manteve-se abaixo de 0,45, com maioria próxima a 0 e a 0,2, indicando uma malha de boa qualidade. Índices de *skewness* altos (o máximo é 1,0) são indesejáveis e podem dificultar a acurácia e

convergência dos resultados [35]. O tamanho do primeiro elemento da parede é inferior a $0,05\text{mm}$, buscando-se um valor satisfatório de $y+$.

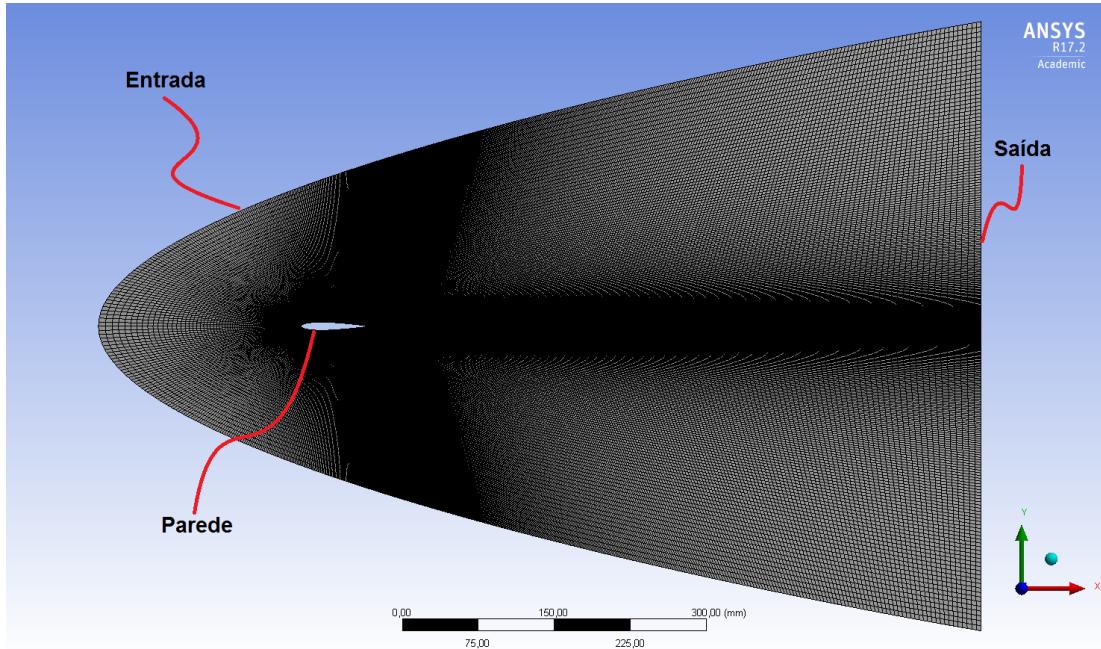


Figura 6 – Malha 2D utilizada nessa etapa

Modelo de turbulência

A abordagem de turbulência adotada foi o *Large Eddy Simulation* (LES), conforme sugerido para simulações acústicas [32] e [31]. Os modelos convencionais de turbulência, como o $k - \varepsilon$ e o $k - \omega$, calculam uma média estatística do campo de pressão. Mas como ruído é uma perturbação de pressão, mais hipóteses sobre as características estatísticas da turbulência seriam necessárias. Para a acústica, a abordagem LES torna-se vantajoso por ser capaz de resolver as flutuações de pressão de larga escala, que são responsáveis pela maioria da geração do ruído em muitos casos [32]. Em particular, utilizou-se como modelo de sub-malha o *Smagorinsky-Lilly*, com constante $C_s = 0,1$ como sugerido em [31]. Em alguns casos utilizou-se também o modelo *Transition SST-SAS*, conforme sugerido no trabalho de Orselli[36]. Trata-se de um modelo híbrido RANS-LES que dispensa a necessidade de malhas excessivamente refinadas e permite simulações com números de Reynolds mais elevados [35], mostrando-se vantajoso para este trabalho.

Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas, com base na nomenclatura da figura acima, foram:

- **Entrada:** Condição de Velocidade de entrada com magnitude e direção.

A magnitude da velocidade foi calculada com base no número de Reynolds de um dos experimentos apresentados na referência [34], $Re = 150.000$. Como densidade utilizou-se $\rho = 1,225\text{kg/m}^3$, como comprimento característico utilizou-se a corda $c = 0,067\text{m}$ e como viscosidade, $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5}\text{kg/m.s}$:

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad \text{logo} \quad 150.000 = \frac{1,225 \cdot v \cdot 0,067}{1,7894 \cdot 10^{-5}}$$

O que resulta em $v = 32,70\text{m/s}$.

Para considerar o efeito de ângulo de ataque, manteve-se a geometria estática na posição horizontal (como na figura acima), e alterou-se a direção da velocidade incidente.

Não aplicou-se nenhuma flutuação de velocidade nesta condição de contorno.

- **Saída:** Pressão de saída

Utilizou-se o valor de 0Pa na saída, relativo a uma condição de operação de 101.325Pa .

- **Parede:** condição de parede estática sem escorregamento

A simulação foi inicializada tomando-se as propriedades do escoamento na condição de contorno de entrada (velocidade e pressão).

Posição do microfone

A posição do microfone apresentada na figura 5 é medida normal ao escoamento. Como nessas simulações manteve-se a geometria horizontal e alterou-se a direção da velocidade na entrada, é necessário corrigir a posição do microfone para que as configurações sejam comparáveis.

Com algumas manipulações trigonométricas, chega-se que as novas coordenadas do microfone, tendo como origem o bordo de ataque são:

- Para $\alpha = 1,58^\circ$: $x = 94,0352\text{mm}$ e $y = 652,8410\text{mm}$
- Para $\alpha = 3,16^\circ$: $x = 75,9988\text{mm}$ e $y = 655,1856\text{mm}$

Tamanho do passo temporal

O tamanho do passo temporal é essencialmente a resolução temporal da simulação. Conforme as ressalvas feitas no item 3.6, essa resolução temporal tem total ligação com a frequência do sinal que se pode obter em uma simulação aeroacústica em CFD. Essa relação segue:

$$f_{max} = \frac{1}{WF \cdot 2 \cdot \Delta t}$$

Na qual WF é a frequência de escrita do sinal acústico no arquivo, ou seja, a cada quantos passos temporais o programa irá avaliar a pressão na posição do microfone. Δt é o tamanho do passo de tempo[31].

Adotou-se inicialmente $WF = 2$ e $f_{max} = 50kHz$, de modo que o tamanho do passo temporal seja $\Delta t = 5 \cdot 10^{-6}s$.

Rotina de simulação

Dividiu-se a simulação em 2 etapas, cada uma com metade do tempo total de simulação.

A inicial resolve o campo de velocidades e pressões no transitório (do estado iniciado até o de regime). Reduziu-se o fator de relaxamento da pressão de 1 para 0,7 procurando maior estabilidade durante esta simulação.

Na etapa seguinte ativou-se o modelo de acústica de Ffowcs Williams-Hawkins e aumentou-se o fator de relaxamento da pressão de volta para 1. Aqui é necessário definir o chamado coeficiente de correlação. Trata-se de um parâmetro importante para o Fluent em simulações aeroacústicas em 2D. O programa internamente cria um volume de fonte de ruído com a profundidade sendo essa grandeza, e desconsidera geração de ruído fora dele. Trata-se de um valor estimado e torna-se difícil confiar cegamente no resultado de SPL obtido, sem que haja uma base experimental por trás [31]. Há na literatura sugestões de valores diferentes de comprimento de correlação, variando, em geral, com a frequência de desprendimento de vórtices [37], [38]. Contudo, uma análise mais profunda fugiria do escopo deste trabalho. Realizou-se uma análise de sensibilidade deste e de outros parâmetros, conforme discutido a seguir e apresentado no item 5.

4.1.2 Análise de sensibilidade

Como dito anteriormente, procurou-se variar diversos parâmetros a cada simulação buscando quantificar seu impacto na geração de ruído. Além disso, é importante determinar quão sensível o resultado é para cada um desses parâmetros da simulação. Assim, em simulações mais demoradas em que uma análise de sensibilidade é inviável,

espera-se empregar a devida atenção no momento da escolha dos parâmetros mais relevantes. Por fim, a presente análise visa aproximar progressivamente mais o resultado computacional do experimental, apresentado em [34].

As diferentes simulações realizadas envolvem variar os seguintes parâmetros, apresentadas na ordem em que foram efetuadas:

Comprimento de correlação (CC)

Trata-se de um parâmetro delicado em simulações aeroacústicas 2D, conforme descrito ao final do item 4.1.1. Variou-se esse parâmetro em quatro valores, múltiplos do tamanho da corda do aerofólio (67mm): $CC = 67\text{mm}$, $CC = 134\text{mm}$, $CC = 201\text{mm}$ e $CC = 268\text{mm}$.

Número de passos e tamanho do passo temporal

O tamanho do passo também é um parâmetro crítico ao se avaliar ruído, pois determina a frequência máxima que pode ser avaliada de um sinal, como discutido no item 4.1.1. Por outro lado, este parâmetro é determinante para o tempo que a simulação irá levar para ser concluída. Os dados experimentais variam até uma frequência de 10kHz , 5 vezes menor do que a f_{max} escolhida inicialmente. Desse modo, procurou-se aqui aumentar o tamanho do passo temporal de 5 e 10 vezes, corrigindo a frequência de escrita (descrita no item 4.1.1) quando necessário. Além disso, avaliou-se também o efeito do número de passos. Este parâmetro representa, juntamente com o tamanho do passo, o tempo de escoamento simulado.

Ordem de discretização temporal

Inicialmente adotou-se o esquema *First Order* por ser o mais leve computacionalmente e em geral suficiente. Em busca de maior acurácia nos resultados [35], e seguindo a recomendação de usar o esquema *Second Order Bounded* com o modelo de turbulência LES, alterou-se a ordem de discretização temporal e comparou-se o resultado.

Esquema de avanço temporal

Conforme sugerido em [31], utilizou-se até aqui o esquema NITA (*Non-iterative Time Advancement*) com esquema de acoplamento pressão-velocidade *Fractional Step*, que é mais rápido que o ITA (*Iterative Time Advancement*). Nessa etapa procurou-se avaliar o efeito de se utilizar o ITA, mesmo que isso compromettesse o tempo de simulação.

Chanfro no bordo de fuga

Até aqui, todas as simulações foram executadas utilizando um bordo de fuga afiado. Entretanto, o trabalho de [Tam e Ju\[39\]](#) sugere uma forte correlação entre o grau de trucagem/chanfro do bordo de fuga e a frequência tonal do ruído gerado pelo aerofólio. Como no experimento de [Arcondoulis, Doolan e Zander\[34\]](#) não há referências sobre detalhes geométricos do bordo de fuga, procurou-se nessa simulação chanfrar o bordo de fuga e avaliar o novo ruído gerado, visando aproximar o resultado computacional obtido do experimental da referência. Chanfrou-se o bordo de fuga a 2% da corda, como apresentado em [39].

Além disso, essa análise é de extrema importância para o presente trabalho, pois este visa avaliar o ruído gerado por modificações em bordos de fuga. Logo, caso haja mudanças significativas no resultado, haverá fortes indícios do potencial de redução de ruído por modificações no bordo de fuga.

Ângulo de ataque (α)

A referência experimental para validação das simulações ([34]) utiliza três ângulos de ataque: 0° , $1,58^\circ$ e $3,16^\circ$. Aqui pretendeu-se comparar os efeitos desses ângulos na geração de ruído, visando novamente aproximar-se do resultado experimental de base.

Refino da malha e $y+$

Um fator importante a se considerar ao caminhar para uma geometria 3D é o tempo de simulação, que está diretamente ligado ao grau de refino da malha. Além disso, há um efeito de dissipação numérica das perturbações de pressão em malhas muito grosseiras. Dessa forma, nesse item procurou-se avaliar o impacto que uma malha mais grosseira no resultado gerado pelo Fluent, visando-se determinar o menor número de elementos possíveis que ainda traz resultados satisfatórios.

Juntamente a isso, procurou-se também determinar o efeito do $y+$ no resultado. Este parâmetro é um adimensional indicativo de resolução de malha próximo à parede em um determinado escoamento, e está ligado às aproximações de cálculos feitas pelos modelos de turbulência na camada limite. Como o ruído se dá por estruturas turbulentas, capturar os efeitos da camada limite é importante para esta análise.

Abordagem de turbulência

Até o momento utilizou-se como abordagem de turbulência o *Large Eddy Simulation* (LES). Conforme explicado no item [4.1.1: Configuração comum - Modelo de turbulência](#), o uso de LES é indicado em simulações acústicas, por resolver melhor as

flutuações de pressão. Entretanto, como se trata de uma das abordagens de turbulência mais caras computacionalmente, procurou-se aqui avaliar a possibilidade do uso de outros modelos de turbulência. Dentre as opções, escolheu-se o $k - \omega$ -SST, conforme utilizado no trabalho de Nogueira[40] e modelos híbridos RANS-LES, como sugerido no trabalho de Orselli[36], particularmente o *Transition SST-SAS*. Este último é um modelo híbrido, que dispensa a necessidade de malhas excessivamente refinadas e permite simulações com números de Reynolds mais elevados [35], como já discutido.

Para cada caso, variaram-se alguns parâmetros em busca de convergência e resolução qualitativa da esteira de vórtices. Particularmente, simulou-se o modelo $k - \omega$ -SST variando o esquema de avanço temporal entre NITA e ITA e a formulação do algoritmo entre baseado na pressão (*pressure-based*) e na densidade (*density-based*).

Divisão da superfície do aerofólio

Buscando identificar a principal fonte de ruído em um aerofólio, separou-se a geometria do aerofólio em três trechos distintos: bordo de ataque, meio e bordo de fuga. Com isso espera-se identificar de onde vem a maior contribuição de ruído, e buscar relações entre camada limite e geração de ruído. O ponto de quebra da superfície foi escolhido separando aproximadamente os 15% mais próximos ao bordo de ataque, e os 15% mais próximo ao bordo de fuga, conforme ilustra a figura 7 a seguir.

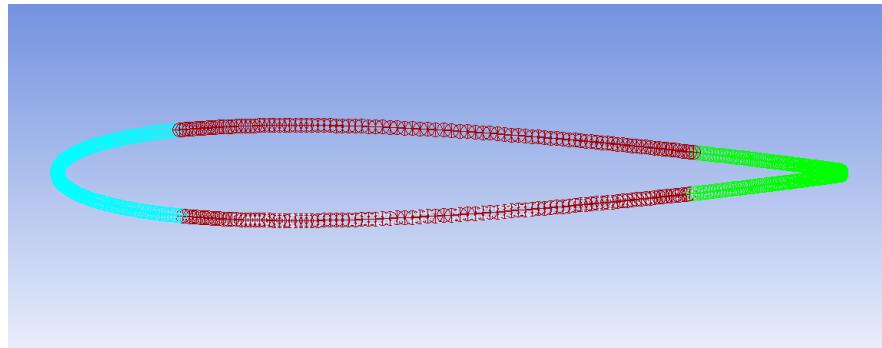


Figura 7 – Diferentes superfícies consideradas como emissoras de ruído

Como modelo de turbulência utilizou-se o *Transition SST-SAS*, e os demais parâmetros mantiveram-se iguais aos das simulações anteriores.

4.2 Avaliação de ruído em geometria 3D de aerofólio

Aqui, tomou-se como base os casos 2D anteriores para criar uma geometria e malha 3D do aerofólio, simulando-as em condições similares e buscando validar melhor

o resultado experimental de referência. Essa etapa também é importante, porque o custo computacional sobe consideravelmente e configurações que afetem a duração da simulação precisam ser cuidadosamente analisadas e escolhidas.

Particularmente, procurou-se analisar o efeito da abordagem de turbulência sobre o resultado de ruído em um caso 3D, para assim escolher qual modelo mais adequado para uma simulação de uma pá eólica. A viabilidade do modelo deverá levar em conta a duração da simulação e a capacidade de gerar resultados de ruído que concordem ao menos qualitativamente com os esperados.

4.3 Simulação de geometria de pá de turbina eólica convencional

4.3.1 Domínio da simulação

O objetivo desta etapa é gerar um resultado de referência para comparar o ruído de uma geometria modificada, avaliando qualitativamente a redução de ruído produzido pela introdução do serrilhado. A pá escolhida foi a descrita no trabalho de [Phelps e Singleton\[41\]](#): pá de $43,2m$, com 4° de ângulo de fluxo na ponta e similar em tamanho com uma turbina GE 1.5XLE. Utilizou-se da periodicidade de uma turbina eólica para considerar apenas um terço do domínio nessa análise.

Com um pá desse tamanho o domínio de simulação seria demasiadamente grande, aumentando significativamente o custo computacional. [Oerlemans e Fuglsang\[21\]](#) indicam, contudo, que o ruído de uma turbina eólica é majoritariamente proveniente da porção próxima à ponta. Desse modo, buscando reduzir o custo da simulação, tomou-se apenas os $14m$ finais da pá. O domínio criado é então definido como uma coroa de tronco de cone de $90m$ a montante até $180m$ a jusante da pá. Os raios são: $120m$ na parte jusante, $240m$ na montante e $30m$ no raio interno da coroa. A figura 8 a seguir ilustra o domínio, bem como o detalhe da ponta da pá.

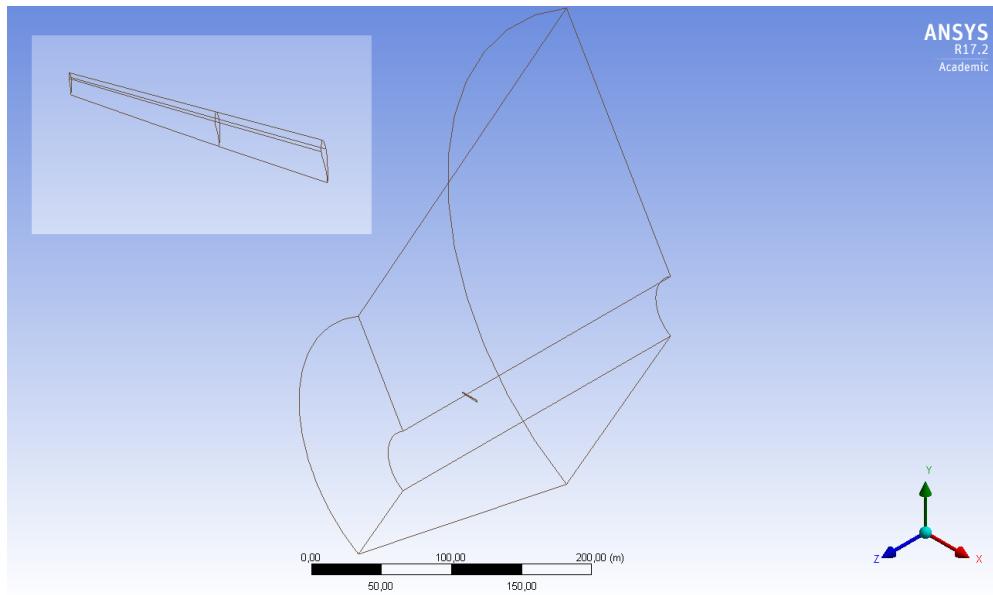


Figura 8 – Domínio da simulação e detalhe da ponta da pá

A aproximação de considerar apenas a ponta da pá acrescenta incerteza no valor de ruído que pode ser extraído. Isso reforça a decisão de se realizar uma análise comparativa entre o resultado com geometria comum e o com geometria modificada, buscando analisar apenas a tendência de redução de ruído, ao invés de obter o valor exato de atenuação.

4.3.2 Condições da simulação

Como condições de contorno foram utilizadas velocidade de entrada de $12m/s$ na direção negativa do eixo z na face de entrada e na face exterior da coroa; pressão relativa nula na face de trás; parede sem escorregamento na pá; periodicidade nas duas faces de simetria; e parede com escorregamento (cisalhamento nulo) na seção do corte da coroa.

Além disso, criou-se uma *cell-zone condition* no corpo fluido para ativar o modelo de referencial móvel (*Moving Frame of Reference*) que leva em conta os termos de aceleração centrípeta nas equações de movimento. Para tal especificou-se uma velocidade angular de $2,22rad/s$ na direção negativa do eixo z . Também ativou-se a periodicidade na malha, selecionando *Mesh Interfaces* com *matching*, *periodic* e distância angular de 120° . Como interfaces, foram selecionadas as duas faces de simetria.

Os demais parâmetros de simulação são: acoplamento pressão-velocidade *SIM-PLE*, relaxação dos termos de maior ordem (*High Order Term Relaxation*), formulação do algoritmo baseado na pressão (*pressure-based*) e formulação transiente *Bounded*

Second Order Implicit. Como passo de tempo utilizou-se novamente $5 \cdot 10^{-6}s$ para obter sinal de ruído na faixa de frequência desejada, conforme discutido no item 4.1.1.

4.3.3 Turbulência e Malha

O custo computacional é uma questão fundamental para se avaliar a viabilidade de um modelo em CFD para estudo de ruído em turbinas eólicas. Como discutido anteriormente, a abordagem LES de turbulência é excessivamente cara e exige um altíssimo grau de refino da malha. Desse modo, utilizou-se o modelo *Transition SST-SAS* que trouxe bons resultados nos estudos de ruído em aerofólio previamente discutidos.

A quantidade de elementos também definirá a viabilidade do modelo. Assim, procurou-se aqui comparar dois cenários de refino de malha, para identificar o impacto do número de elementos no resultado obtido e entender o grau de refino necessário. Em ambos os casos aplicou-se dois níveis de refino nas proximidades da pá, utilizando esferas de influência e inflação da malha, como pode ser observado nas figura 9 abaixo. Um caso possui 3,1 milhões de elementos e o outro, 4,6 milhões.

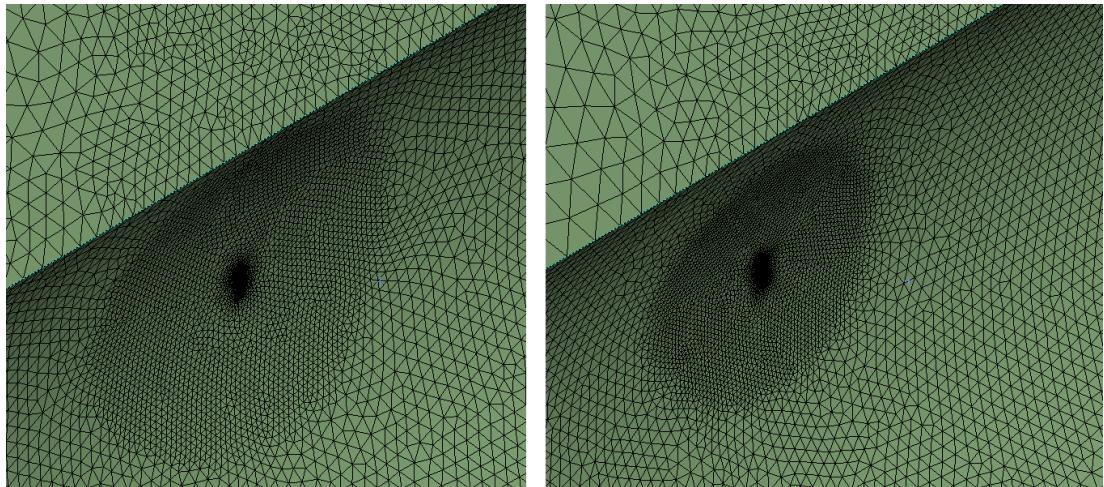


Figura 9 – Detalhe da malha. À esquerda a malha inicial, e à direita a refinada

4.3.4 Posição do microfone

Para se determinar a posição dos receptores, tomou-se como base a norma *IEC 61400-11*, relativa a técnicas de medição de ruído gerado por turbinas eólicas [42]. Nela define-se uma distância de referência segundo a expressão $R_0 = H + D/2$, onde H é a altura do eixo da turbina e D é o diâmetro do rotor. Para a turbina em questão, o valor de R_0 é 115m, e deve-se dispor os microfones no solo conforme figura 10 abaixo.

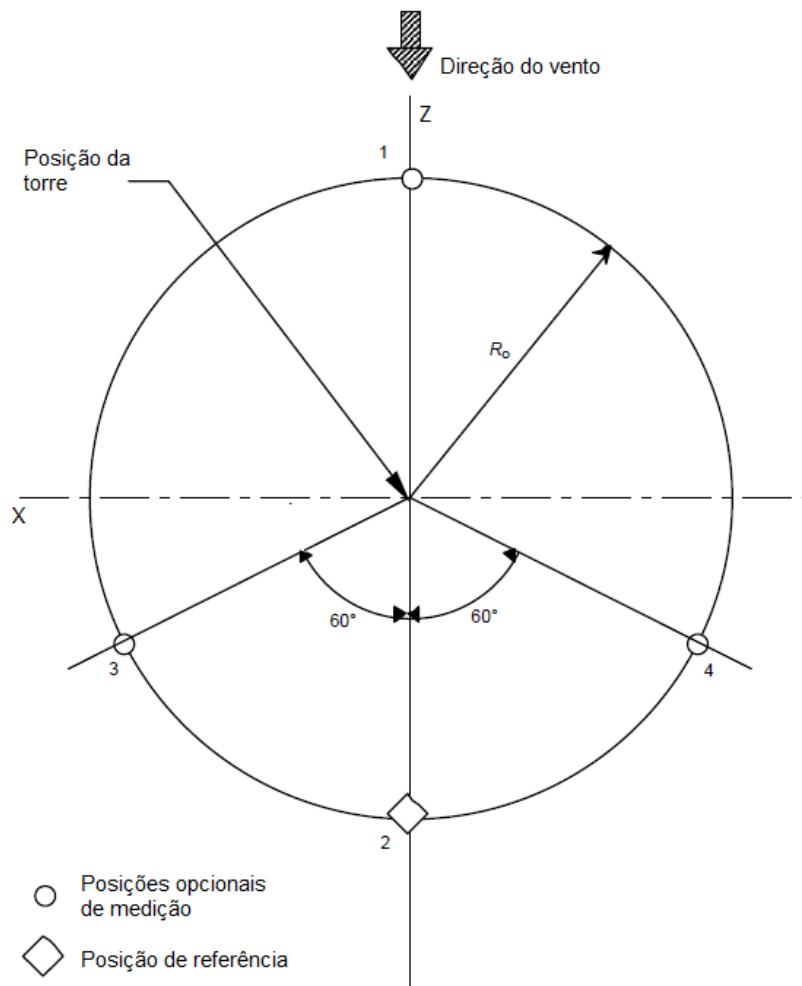


Figura 10 – Vista superior da posição padrão dos microfones, adaptado e traduzido de [42]

Levando-se ainda em consideração a altura da torre, a distância máxima entre a ponta da pá e o receptor é de aproximadamente 162m, de modo que sinais de ruído provenientes dessa região levariam em torno de 0,5s para chegar ao solo. Aqui, a questão do número de passos de tempo na simulação torna-se extremamente importante, pois caso simule-se menos que 0,5s de escoamento não será possível extrair nenhum sinal sonoro na posição estipulada na norma.

Como discutido no item 4.1.1, para que seja possível obter o sinal de ruído nas frequências de interesse, o tamanho do passo de tempo deve ser $5 \cdot 10^{-6}$ s, de modo que posicionando os microfones conforme a norma seriam necessários 100.000 passos de tempo. Com os recursos computacionais disponíveis para este projeto, isso significaria rodar a simulação por mais de 40 dias, tornando-a excessivamente cara.

Desse modo, fez-se aqui outra simplificação e posicionaram-se os microfones a um décimo da distância de cada eixo, resultando em aproximadamente um terço de

distância linear entre a ponta da pá e a posição da norma. Nessas condições, os microfones estão posicionados consideravelmente acima do solo, o que torna o cenário irreal. Entretanto, do ponto de vista de análise qualitativa trata-se de uma hipótese válida, pois assumindo que não há dissipação do ruído, o espectro sonoro no solo será o mesmo (apesar de atenuado) daquele presente na posição dos receptores. Assim, para se avaliar se houve redução de ruído nas frequências de interesse com a introdução do bordo de fuga serrilhado, a posição do microfone não é determinante, dentro da faixa discutida.

Para essa aproximação, seria possível fazer um correção de cada valor de SPL da curva na posição de interesse (no solo, conforme a norma), aplicando uma atenuação proporcional a $1/r^2$. Entretanto, para tal é necessário assumir que se está suficientemente longe da fonte de ruído para considerá-la aproximadamente pontual, o que definitivamente não é o caso. Novamente, como a análise de ruído será apenas qualitativa, tal correção não é fundamental e não prejudicará a conclusão do trabalho.

A tabela 1 a seguir resume a posição dos microfones.

Tabela 1 – Coordenadas dos receptores definidos na simulação, em relação ao eixo do rotor

Microfone	x (m)	y (m)	z (m)
1	0	-7	11,5
2	0	-7	-11,5
3	9,96	-7	-5,75
4	-9,96	-7	-5,75

4.4 Simulação de geometria de pá de turbina eólica com bordo de fuga modificado

4.4.1 Características do serrilhado e da simulação

A modificação de bordo de fuga implementada foi bordo de fuga serrilhado, tomando como base as proporções geométricas do trabalho de [Avallone, Probsting e Ragni\[19\]](#). O serrilhado é essencialmente composto por uma sequência de triângulos com arestas aparadas adicionados ao bordo de fuga da pá, acompanhando sua torção e seu ângulo de fluxo. Como comprimento de onda inicial utilizou-se 0,25m, e amplitude (pico a pico), 0,4m. A figura 11 a seguir ilustra a geometria da ponta de pá modificada.

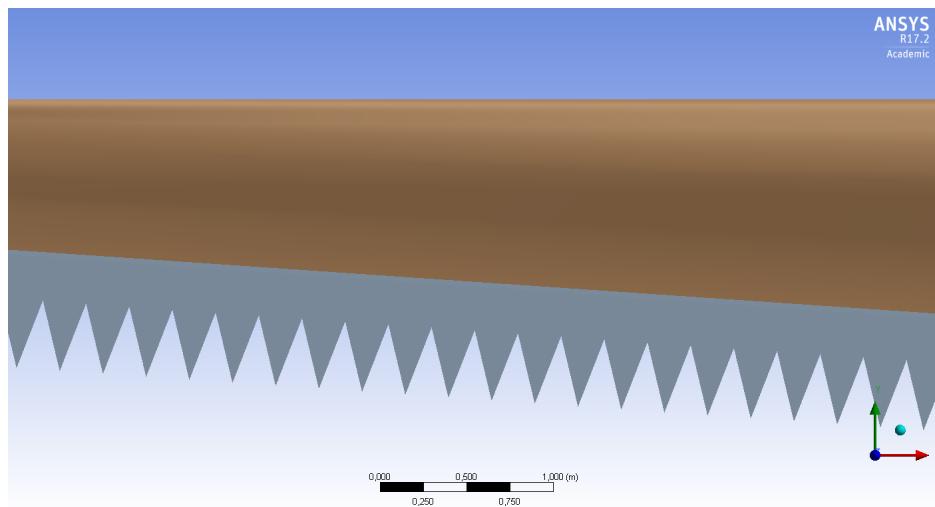


Figura 11 – Detalhe da geometria de serrilhado criada

Utilizou-se nessa etapa o mesmo domínio e os mesmos parâmetros de simulação. Também realizou-se um estudo de refino de malha análogo ao apresentado no item 4.3.3, utilizando-se como número de elementos 4,0 milhões para o caso inicial e 5,8 milhões para o refinado. O aspecto das diferentes malhas é similar ao da figura 9.

4.4.2 Variação dos parâmetros do serrilhado

Para se analisar o impacto das características geométricas do serrilhado na redução de ruído, procurou-se aqui variar isoladamente o comprimento de onda (λ) e a amplitude (A). As figuras 12, 13, 14 e 15 apresentadas a seguir são meramente ilustrativas, portanto a escala (mantida igual) é irrelevante e foi omitida. Os casos simulados foram:

- Referência: $A = 0,4m$ e $\lambda = 0,25m$

Caso discutido anteriormente e apresentado na figura 11.

- Amplitude +50%: $A = 0,6m$ e $\lambda = 0,25m$

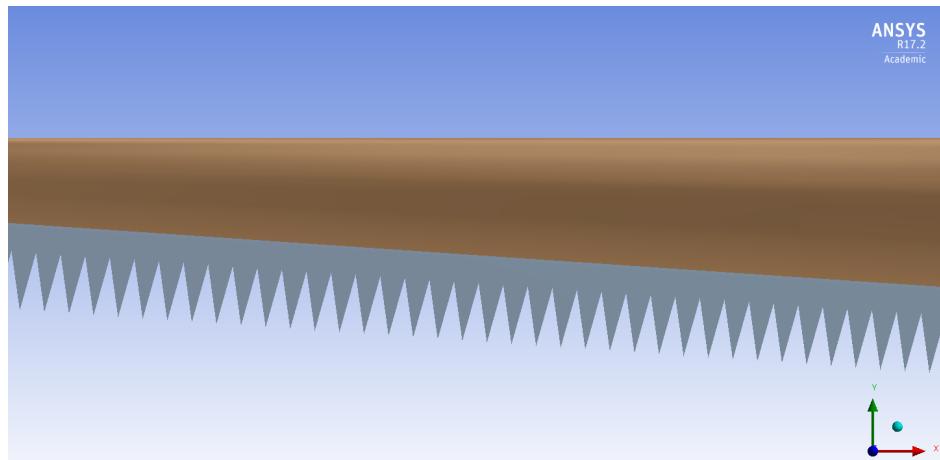


Figura 12 – Detalhe da geometria de serrilhado com amplitude 50% maior

- Amplitude -50%: $A = 0,2m$ e $\lambda = 0,25m$

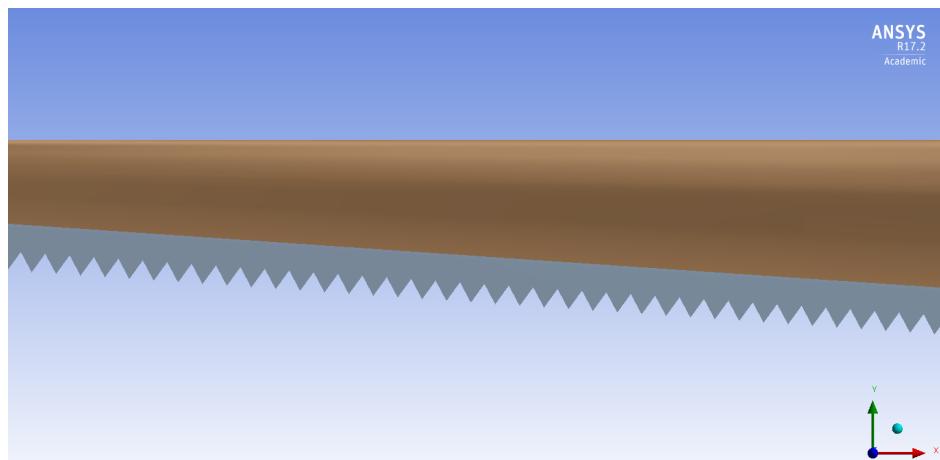


Figura 13 – Detalhe da geometria de serrilhado com amplitude 50% menor

- Dobro de λ : $A = 0,4m$ e $\lambda = 0,5m$

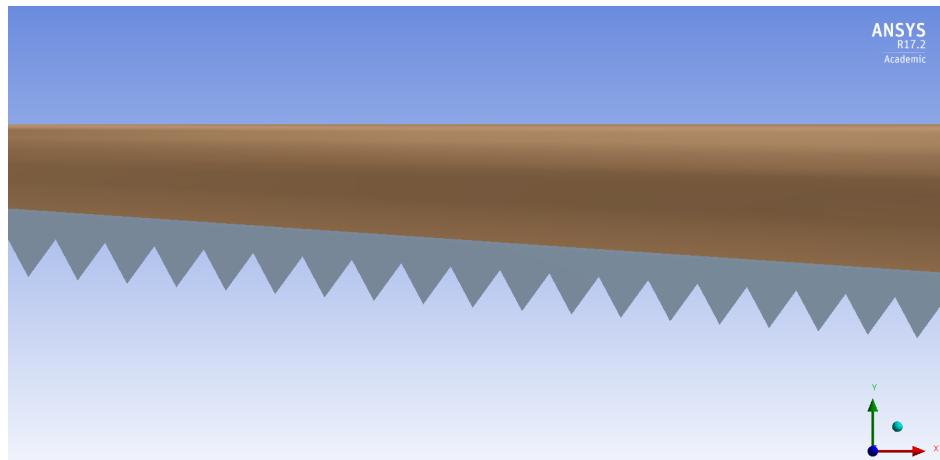


Figura 14 – Detalhe da geometria de serrilhado com o dobro de comprimento de onda

- Três vezes λ : $A = 0,4m$ e $\lambda = 0,75m$

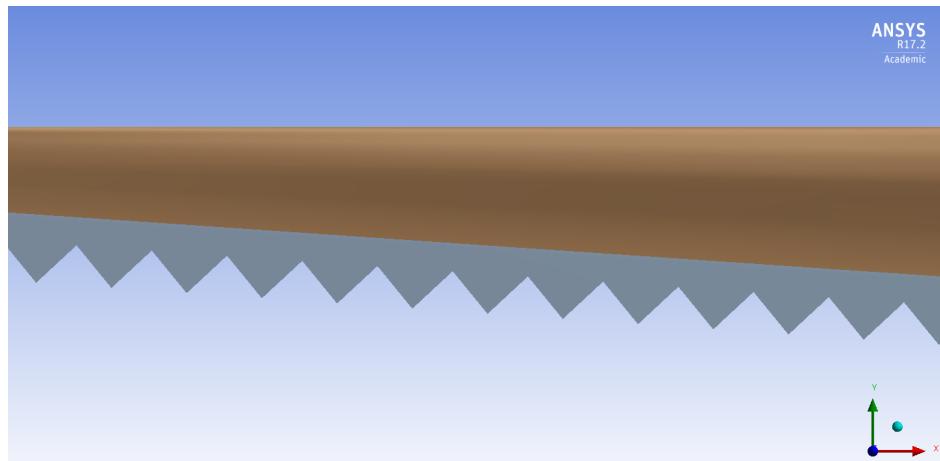


Figura 15 – Detalhe da geometria de serrilhado com o triplo de comprimento de onda

5 RESULTADOS

5.1 Aerofólio 2D

Utilizando a abordagem incremental de dificuldade descrita anteriormente, apresentam-se aqui alguns resultados iniciais obtidos, ainda apenas referentes à geometria 2D de aerofólio NACA0012. Para validar os resultados parciais obtidos, utilizou-se como referência a publicação de [Arcondoulis, Doolan e Zander\[34\]](#).

As figuras a seguir apresentam dois dos resultados apresentados na referência, um para cada ângulo de ataque. Note que densidade espectral é um termo equivalente a Nível de Espectro de Pressão (PSL) descrito no item [3.3](#), para o caso particular de largura de banda de 1Hz. Lembrando que para largura de banda suficientemente pequena o SPL se aproxima do PSL, conclui-se que, em última análise, as figuras abaixo trazem em seu eixo das ordenadas o SPL médio para a frequência central de cada faixa medida [\[43\]](#).

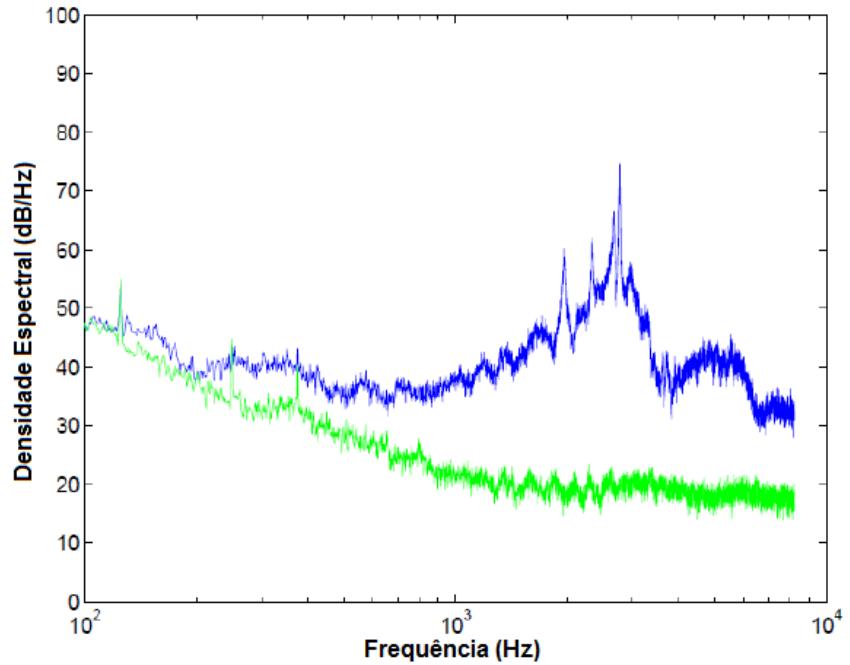


Figura 16 – Densidade Espectral vs Frequência para $\alpha = 1,58^\circ$. Em azul, a medição com o aerofólio na seção de testes; em verde, a do ruído de fundo. Extraído de [\[34\]](#) e traduzido

Para $\alpha = 1,58^\circ$, nota-se claramente o tom primário ao redor de $2,5\text{kHz}$ de 72dB ,

com diversos outros picos para frequências entre $2,0\text{kHz}$ e $2,5\text{kHz}$. Além disso, o SPL médio para frequências baixas (até 1kHz) fica próximo a 40dB . Há ainda uma banda de frequência entre $3,5\text{kHz}$ e 6kHz , antes do sinal reduzir-se abaixo de 40dB .

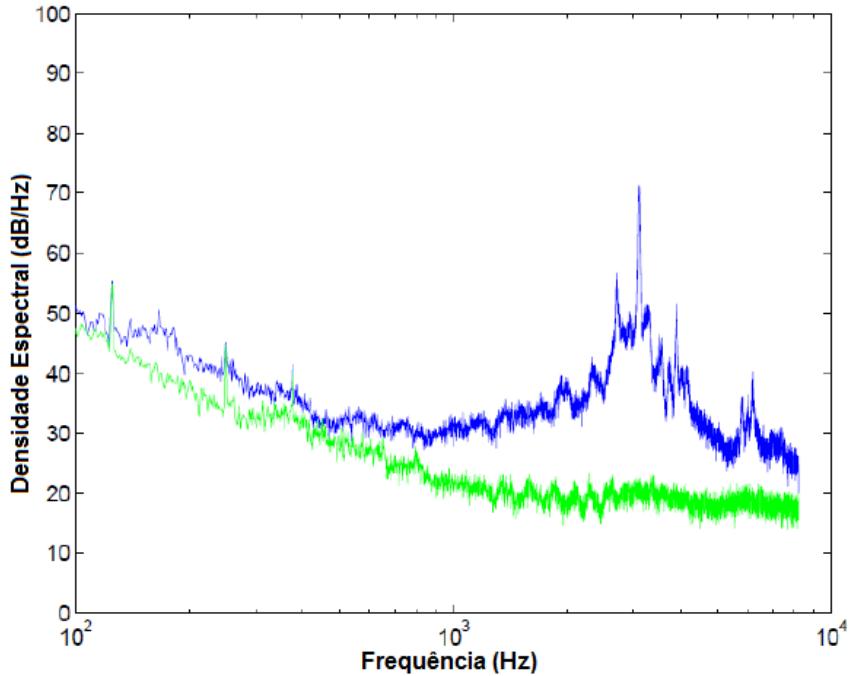


Figura 17 – Densidade Espectral vs Frequência para $\alpha = 3,16^\circ$. Em azul, a medição com o aerofólio na seção de testes; em verde, a do ruído de fundo. Extraído de [34] e traduzido

De forma análoga, para $\alpha = 3,16^\circ$ o pico primário ocorre próximo a $3,0\text{kHz}$ atingindo 70dB . Outros picos estão presentes ao redor dessa frequência. A intensidade do ruído para baixas frequências também é inferior à anterior.

A seguir apresenta-se o resultado da análise de sensibilidade preliminar de cada parâmetro relevante, como descrito no item 4.1.2. Estes resultados serão comparados às figuras acima, buscando entender o efeito de cada parâmetro e visando obter o resultado mais fiel possível, dentro das limitações do modelo adotado. Para gerar as curvas, aplicou-se a transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform* no Fluent) nos dados de oscilação de pressão gerados durante a simulação. Os resultados foram exportados e tratados no programa de pós processamento da ANSYS, o CFD-Post.

5.1.1 Comprimento de correlação

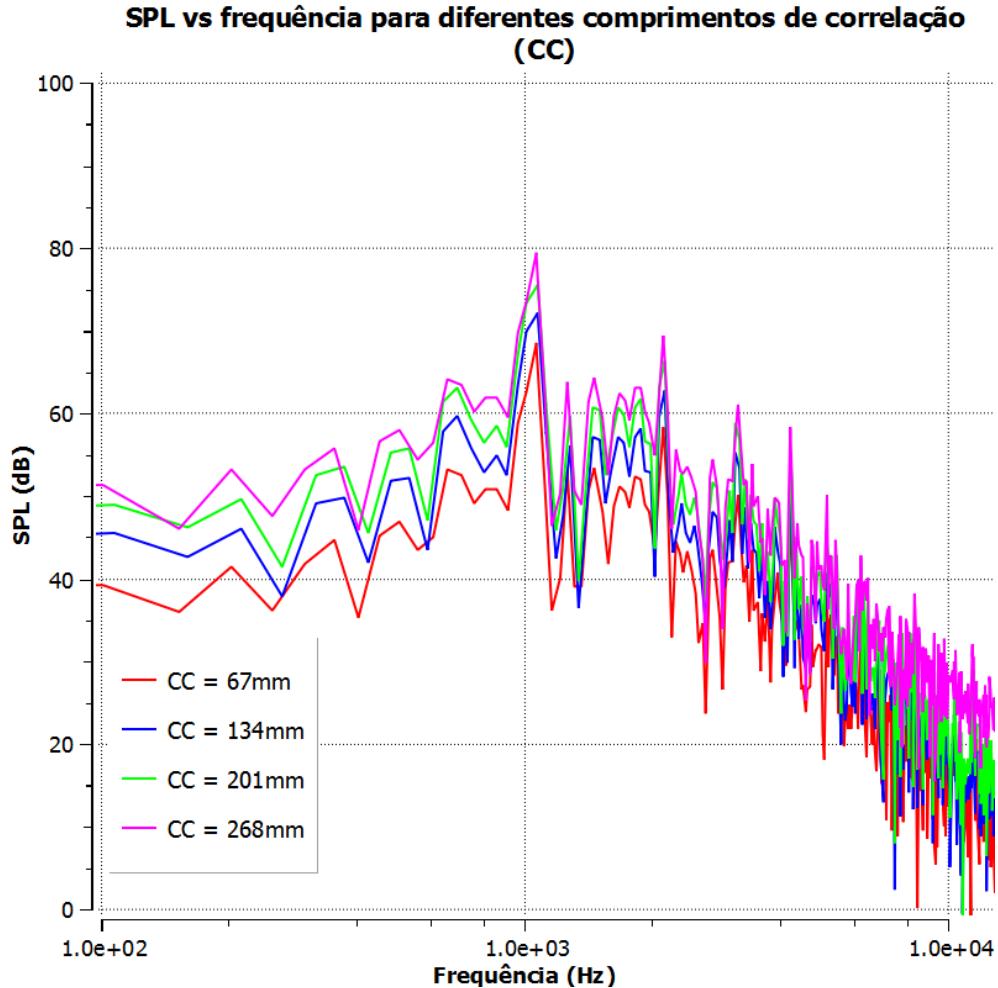


Figura 18 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para quatro diferentes comprimentos de correlação

Para os quatro valores diferentes de comprimento de correlação, nota-se que o formato geral da curva não é significativamente alterado. O efeito dessa grandeza é, portanto, de apenas ”sintonizar” o resultado da simulação 2D na posição esperada, deslocando verticalmente a curva conforme o acréscimo do comprimento de correlação.

Para as simulações seguintes, adotou-se o valor de 134mm para a referida grandeza, por ser o valor no qual o pico da curva qualitativamente se aproxima do da figura de referência (Figura 16).

Importante ressaltar que, apesar do pico de SPL atingir valores comparáveis com o da referência, ele não ocorre na mesma frequência (1kHz aqui, frente a 2,5kHz lá). Contudo, o tom secundário obtido ocorre na mesma frequência do tom primário do experimento. Isso, somado aos valores de ordem de grandez próximos de SPL sugerem

que a simulação aqui apresentada é qualitativamente válida. De fato, simulações aeracústicas em 2D devem apenas ser utilizar para se avaliar a tendência dos resultados, como explicado no item 3.7 e 4.1.1.

5.1.2 Número de passos e tamanho do passo temporal

Inicialmente simulou-se procurando aumentar o tamanho do passo temporal de $5 \cdot 10^{-6}$ s para $5 \cdot 10^{-5}$ s. Contudo, o resultado não convergiu. Utilizando um passo um pouco menor, de $1 \cdot 10^{-5}$ s, a simulação em primeiro momento pareceu estar estável, porém logo divergiu também. Para se ter certeza da conclusão, procurou-se por fim simular com o tamanho do passo variável (*Adaptive Time Stepping*), buscando o maior passo possível dentro de uma faixa de $5 \cdot 10^{-5}$ s até $5 \cdot 10^{-7}$ s que garantisse a estabilidade. Após poucas iterações, o programa passou a utilizar apenas o passo utilizado inicialmente: $5 \cdot 10^{-6}$ s, indicando ser o maior possível que garante estabilidade.

No caso do número de passos, por sua vez, obteve-se o resultado apresentado abaixo.

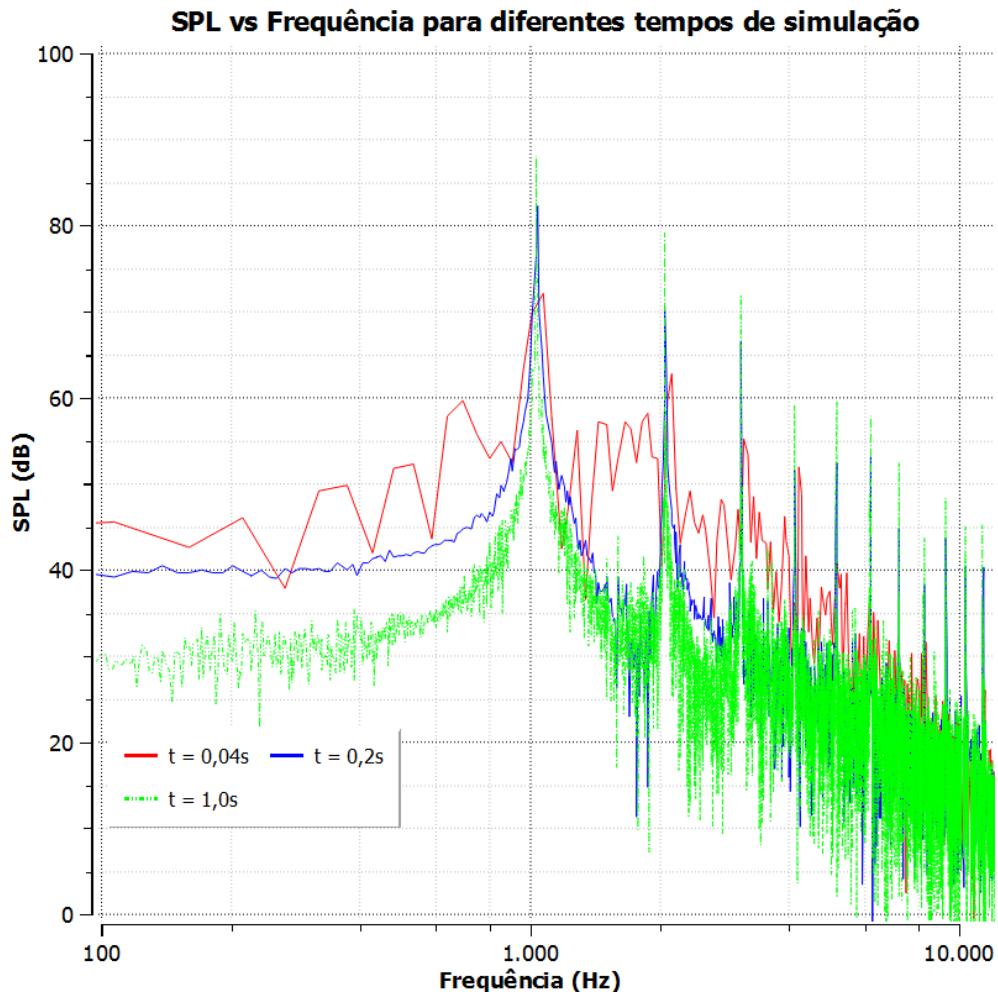


Figura 19 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para três diferentes tempos de simulação

Note que a curva verde não está traçada em linha contínua como as demais para facilitar a visualização dos picos.

Fica evidente que quanto maior o tempo de simulação, melhor a resolução dos picos de SPL. Não há mudança na frequência em que ocorrem os picos, portanto não há sérias alterações no espectro de pressão, mantendo o resultado ainda um pouco distante do experimental. Para baixas frequências, o SPL mantém-se ao redor de 40dB, como ocorre na referência.

Como o tempo de simulação aumenta drasticamente entre cada um dos casos aqui apresentados, tomou-se como satisfatório o valor intermediário de $t = 0,2s$. A partir deste valor já se consegue diferenciar claramente os tons principais do sinal, e não há ganho significativo de resolução ao se aumentar o tempo que compense o aumento da duração da simulação. Assim, passou-se a utilizar $t = 0,2s$ como tempo de simulação, ou seja, 40.000 passos temporais.

5.1.3 Ordem de discretização temporal

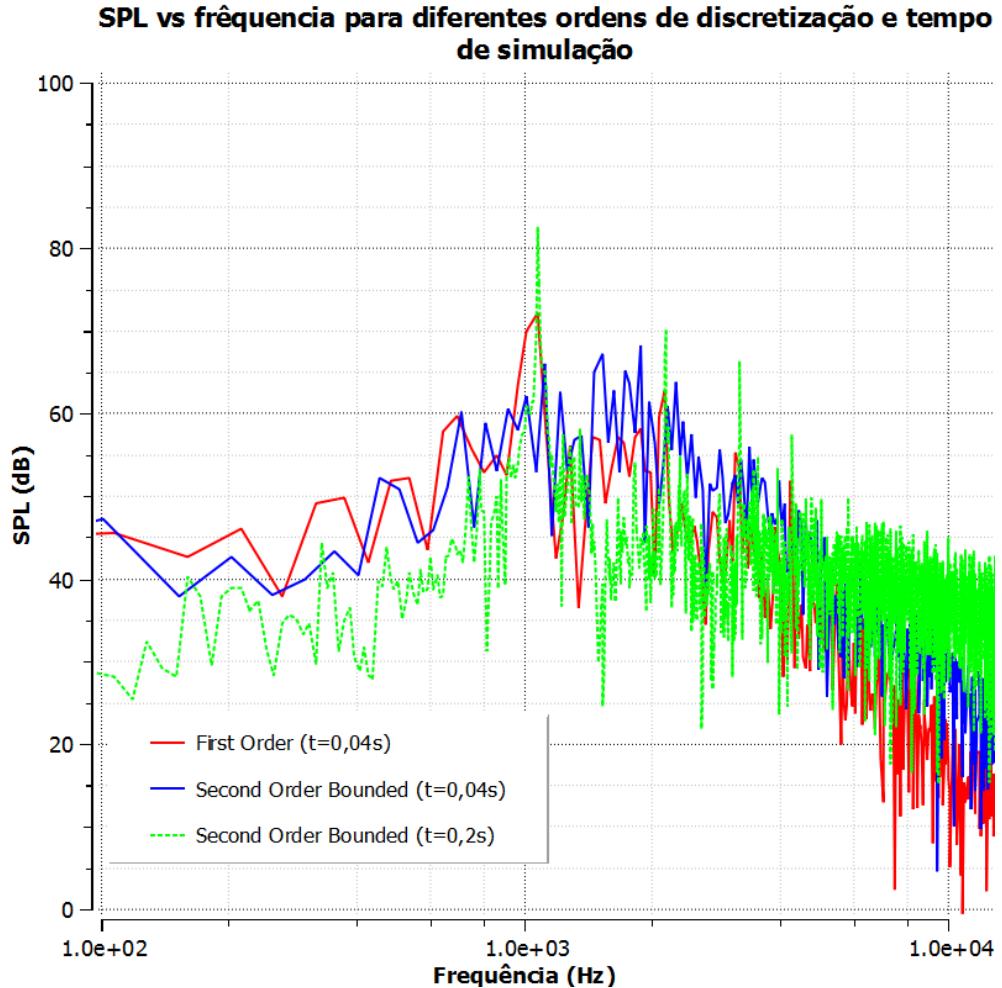


Figura 20 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para diferentes ordens de discretização e tempos de simulação

A partir do resultado mostrado na figura 20, nota-se que a ordem de discretização temporal altera o formato da curva. Isso é particularmente intenso para $t = 0,04s$, no qual o esquema *Second Order Bounded* alivia os picos próximos a 1kHz e acentua os perto de 2kHz, caminhando para o resultado de referência. Aumentando-se o tempo de simulação para $t = 0,2s$, contudo, o pico a 1kHz volta a aparecer, além de elevar consideravelmente o SPL para altas frequências, quando comparado com a curva de $t = 0,04s$ da figura 19.

Essa diferença com o tempo de simulação também pode ser devida à frequência de escrita do arquivo do microfone. Escreveu-se em todos os casos um arquivo a cada 200 iterações, portanto há muito mais pontos para simulações mais longas do que para simulações mais curtas. Uma análise futura pode ser feita sobre esta ressalva.

Para as simulações seguintes passou-se a utilizar a formulação transiente de *Second Order Bounded*.

5.1.4 Esquema de avanço temporal

Até aqui, todas as simulações foram realizadas utilizando-se o esquema NITA, como sugerido em [31]. Alterando-se o esquema para ITA, o resultado obtido foi:

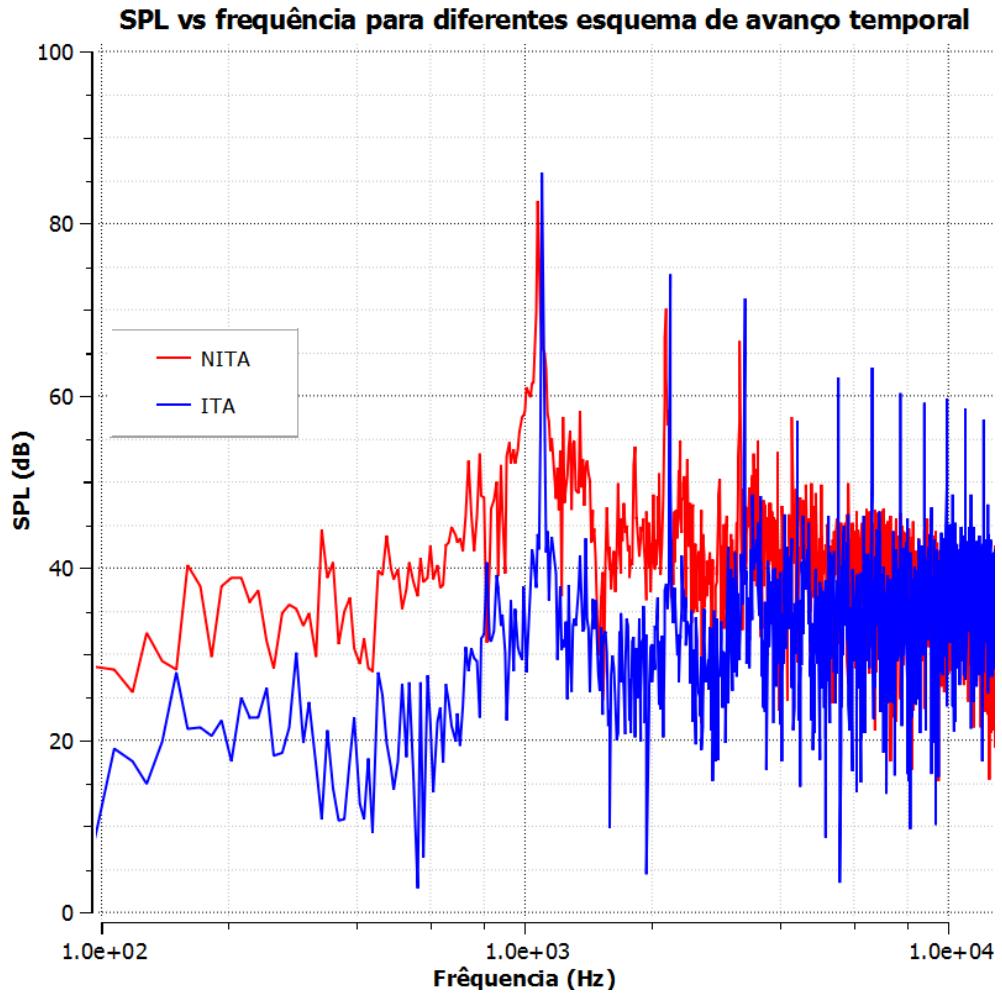


Figura 21 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para dois esquemas de avanço temporal

O esquema ITA reduziu quase todos os pontos na faixa de freqüência utilizada, aumentando a intensidade relativa dos picos (tamanho do pico comparado com a média ao redor). Não houve alterações significativas nas freqüências de ocorrência dos picos.

Manteve-se o uso de NITA nas simulações subsequentes, por se tratar de um esquema mais rápido e sugerido nas referências do Fluent [31].

5.1.5 Chanfro no bordo de fuga

Nessa etapa, procurou-se aplicar a metodologia sugerida em [39] e chanfrar o bordo de fuga a 2% da corda. O resultado obtido foi:

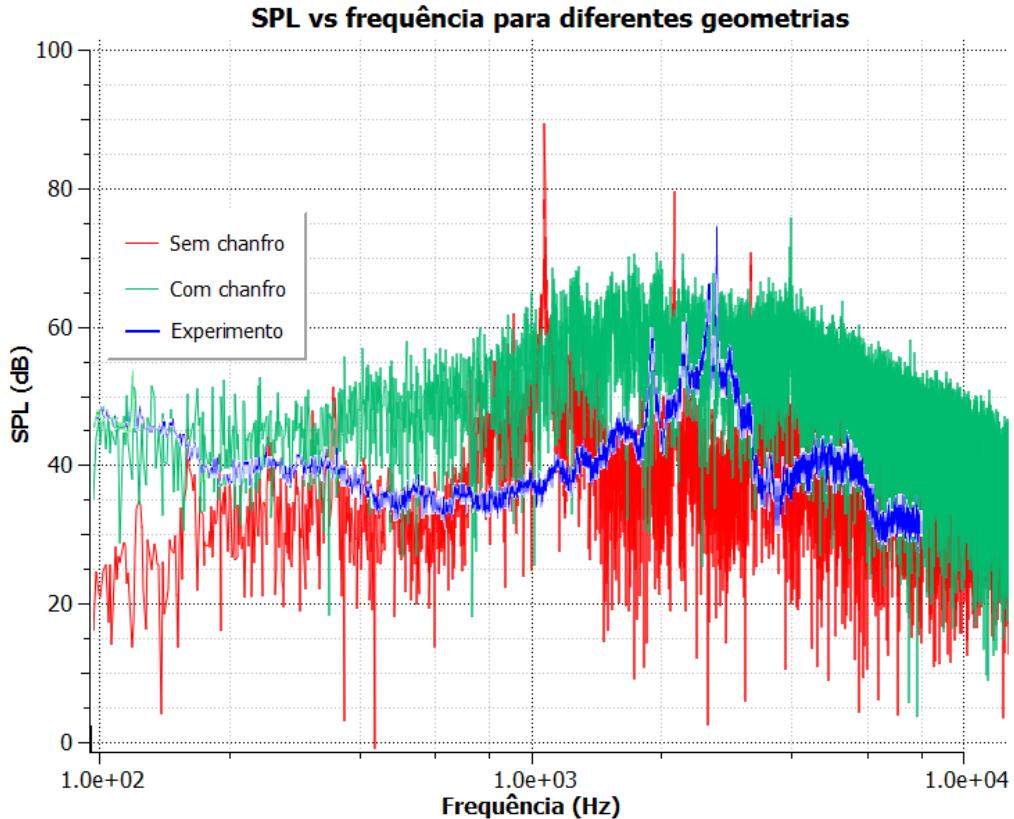


Figura 22 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com e sem chanfro

Nota-se uma grande mudança na curva de SPL vs frequência. Não há mais o pico ao redor de 1kHz e a curva indica uma tendência de tom primário ao redor de 2kHz e um secundário em 3kHz, o que se aproxima muito mais do resultado experimental de Arcondoulis, Doolan e Zander[34]. Além disso, buscando uma maior resolução dos resultados para baixas frequências, esta simulação foi executada para 1,0s de escoamento, conforme a tendência presente na figura 19.

O presente resultado é de extrema importância para este trabalho, pois mostrou uma forte dependência da geração de ruído com formato do bordo de fuga. Isso revela o potencial de redução de ruído alterando-se a geometria do bordo de um aerofólio e, extrapolando, do bordo de fuga de uma pá de turbina eólica. Por se tratar de um resultado chave, optou-se por sobrepor o ao experimental utilizado como referência

[34].

Note que a malha utilizada teve de ser alterada para se adaptar à nova geometria. Isso certamente traz discrepâncias entre as curvas, contudo esse não é o agente principal da mudança de comportamento da curva.

Nas simulações seguintes passou-se a utilizar a nova geometria, com o bordo de fuga chanfrado a 2% da corda, bem como 0,2s de escoamento.

5.1.6 Ângulo de ataque

Como explicado no anteriormente, o trabalho de Arcondoulis, Doolan e Zander[34] realizou experimentos em diferentes ângulos de ataque. Foram apresentados os resultados para $\alpha = 1,58^\circ$ (figura 16) $\alpha = 3,16^\circ$ (figura 17). Nessa etapa, procurou-se comparar o resultado numérico para os dois referidos ângulos de ataque.

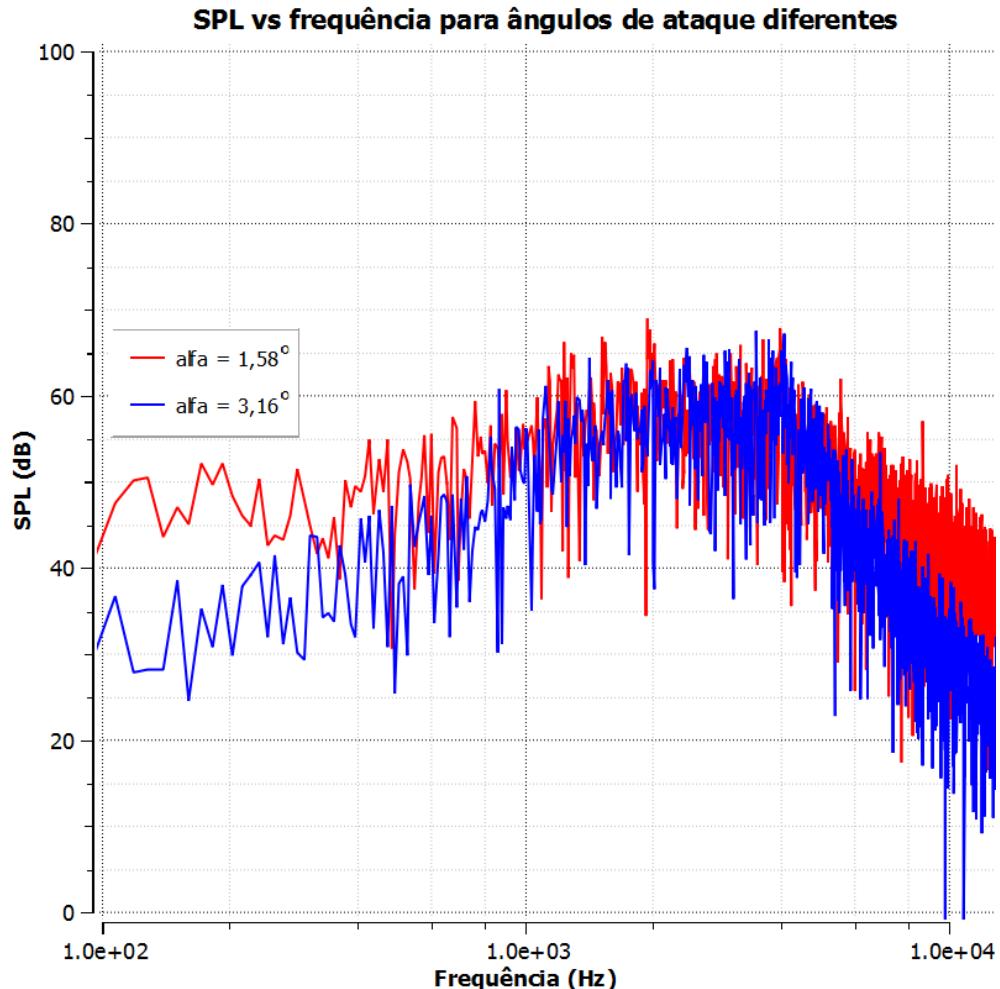


Figura 23 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para dois ângulos de ataque diferentes

Nota-se que os picos ao redor de $1kHz$ e $2kHz$ são menos intensos para $\alpha = 3,16^\circ$, além de haver uma tendência mais clara da curva formar um pico global próximo a $3kHz$. Isso condiz mais com o respectivo resultado experimental (figura 17) em comparação com o caso de $\alpha = 1,58^\circ$ (comparado com a figura 16).

Importante notar que uma simulação para $\alpha = 0^\circ$ foi realizada, porém não apresentou valores significativos de SPL. Desse modo, optou-se por omiti-la dos resultados.

Desse modo, passou-se a utilizar $\alpha = 3,16^\circ$ nas simulações subsequentes.

5.1.7 Refino da malha e $y+$

O resultado dessa análise de sensibilidade é apresentado abaixo.

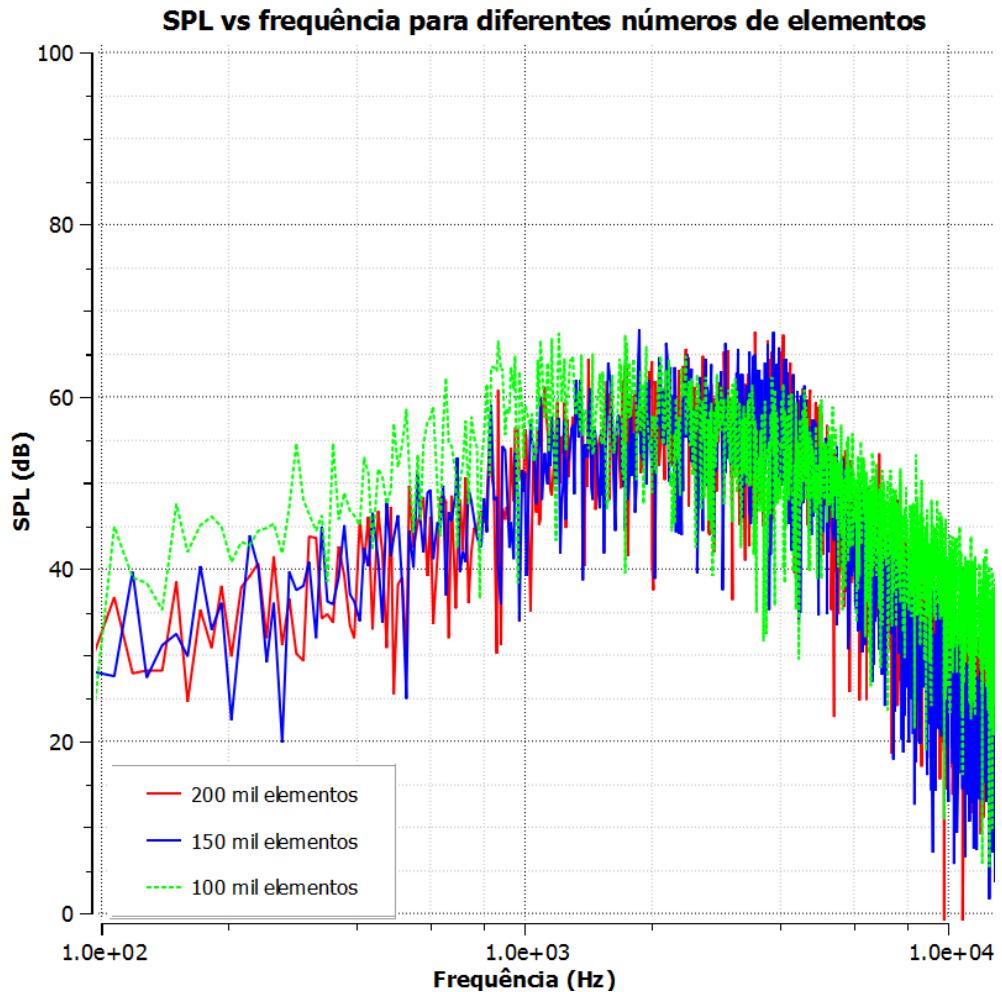


Figura 24 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência para três graus de refino de malha diferentes

De um modo geral, as três curvas são semelhantes, sendo apenas a verde um pouco diferente. A azul e a vermelha são bastante próximas, indicando que uma redução de

25% no número de elementos não afeta qualitativamente o resultado final. Para essas duas curvas as frequências de pico e o valor de SPL nos picos são comparáveis. Desse modo, o grau "mediano" de refino (ou seja, 150 mil elementos) já é satisfatório.

Entretanto, uma coisa importante precisa ser avaliada: o valor do adimensional $y+$. Para 200 mil elementos, o $y+$ médio na superfície do aerofólio é de aproximadamente 1,5. Para 150 mil elementos, 2,0 e para 100 mil elementos o valor passa a 4,0. Ou seja, não é possível ainda concluir se a diferença nas curvas acima é causada pela mudança de número de elementos ou pela mudança no $y+$.

Para 200 mil e 150 mil elementos as curvas são bem parecidas e o $y+$ é comparável, apesar de haver uma mudança grande (25%) no número de elementos. Conclui-se que o efeito exclusivo do número de elementos não é tão relevante (para essa ordem de grandeza de elementos) quanto do $y+$. Além disso, a mudança da curva azul para a verde é considerável, acompanhando a mudança maior no $y+$, o que reforça o argumento. De fato, o $y+$ está associado à resolução necessária para se capturar os efeitos da subcamada viscosa, ou seja, tem relação direta com a resolução dos vórtices gerados, que por sua vez afetam a geração de ruído.

Como descrito anteriormente, existe o efeito de dissipação numérica em malhas grosseiras que certamente passa a ser importante a partir de certo ponto. Contudo, acredita-se que a discrepância observada no resultado refere-se a variações no $y+$ mais do que no tamanho dos elementos ao longe da fonte sonora. Investigações mais profundas sobre essa análise são necessárias para se tomar uma conclusão definitiva, porém fogem do escopo deste trabalho.

5.1.8 Abordagem de turbulência

Aqui pretendia-se analisar a viabilidade de modelos de turbulência menos computacionalmente caros, particularmente o $k - \omega$ -SST e o *Transition SST-SAS*. Os resultados mais relevantes obtidos, sobrepostos com a curva utilizada de referência são apresentados na figura (25) a seguir.

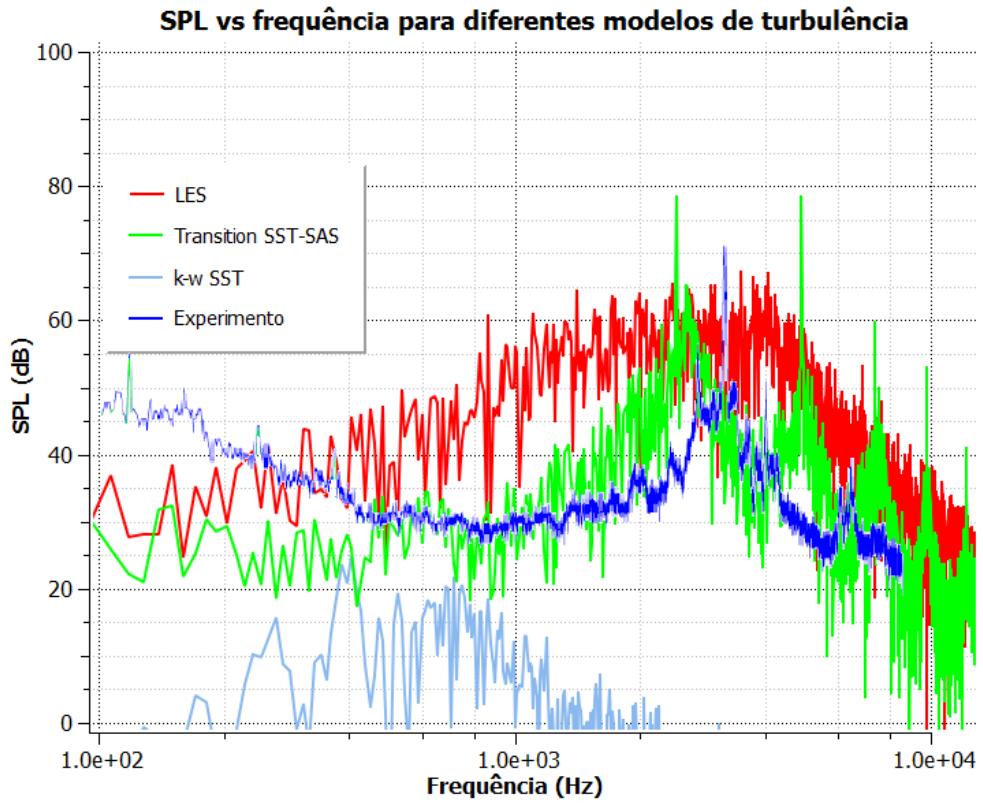


Figura 25 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com diferentes modelos/abordagens de turbulência para caso 2D

O modelo $k - \omega$ -SST na formulação *pressure-based* não forneceu resultado de ruído: a curva SPL vs frequência não apresentou valores positivos de SPL. O mesmo comportamento foi observado tanto no esquema de avanço NITA quanto no ITA. Já utilizando-se a formulação *density-based*, o resultado obtido foi ligeiramente melhor, apresentando valores positivos de SPL, como mostra a figura (25). Apesar disso, a ordem de grandeza do ruído não foi conforme o esperado. Em ambos os casos a esteira de vórtice não foi resolvida.

O modelo *Transition SST-SAS*, por sua vez, apresentou resultados muito bons, inclusive melhores do que o LES. Os tons primários e secundário encontram-se bem próximos dos experimentais, estando ambos apenas deslocados de um mesmo valor para a esquerda. Obteve-se pela primeira vez uma curva com picos intensos em frequências distintas e próximas aos do resultado experimental, validando o uso da ferramenta para análise de ruído.

5.1.9 Separação da superfície do aerofólio

Três simulações foram executadas nessa etapa, cada uma definindo-se como fonte emissora de ruído um dos três trechos de separação do aerofólio: bordo de ataque, meio e bordo de fuga. As diferentes curvas de SPL obtidas são apresentadas na figura 26 a seguir

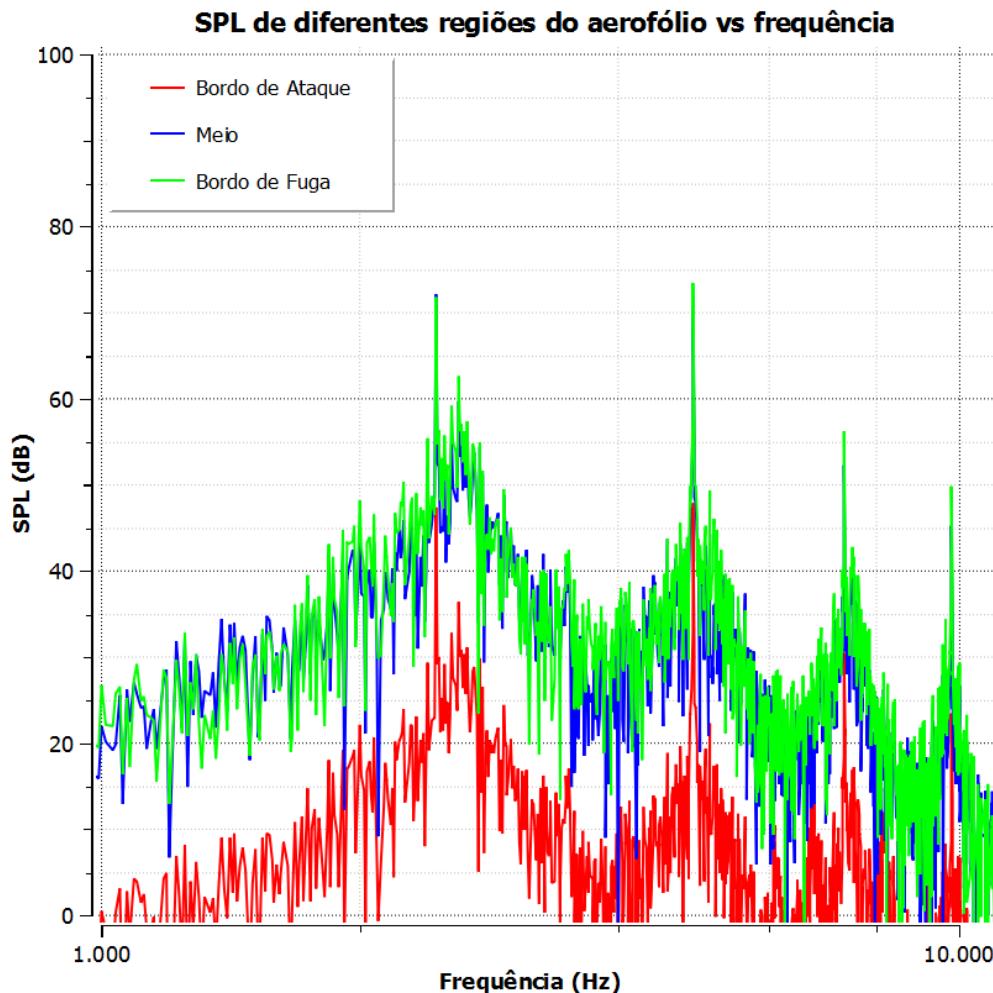


Figura 26 – Resultado numérico obtido de SPL vs frequência de ruído proveniente de cada trecho do aerofólio 2D

É evidente que, como esperado, o ruído de bordo de ataque pouco contribui no ruído geral produzido. Além disso, o de bordo de fuga se sobressai ao da porção central, apesar de a diferença não ser tão grande. Essa proximidade entre o ruído gerado pela porção central e pelo bordo de fuga sugere um relação entre o desprendimento da camada limite e a geração de ruído. De fato, a figura 27 a seguir confirma que há desprendimento nas regiões citadas, reforçando a tese anterior.

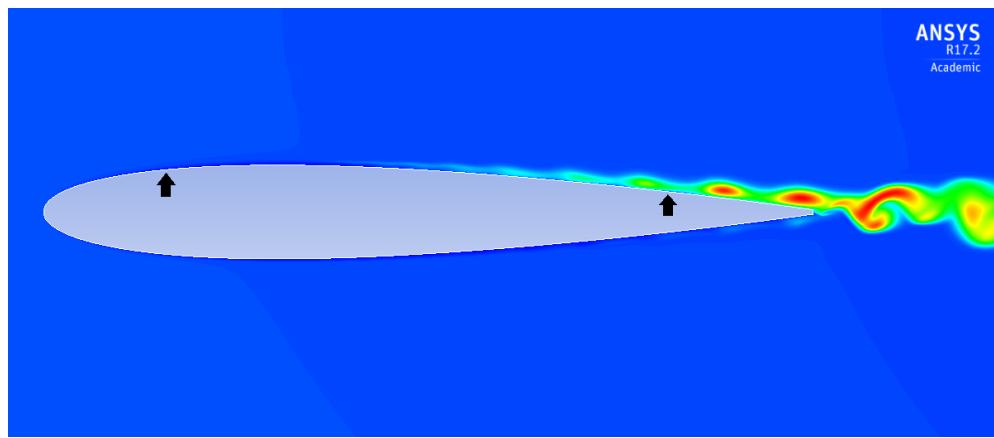


Figura 27 – Cotornos de intensidade de turbulência próximos a superfície do aerofólio.
As setas indicam ponto aproximado da quebra (virtual) das superfícies

Note que a figura anterior apresenta os contornos de intensidade de turbulência e sua escala foi omitida, pois o interesse é apenas na visualização do escoamento.

Conclui-se portanto que artifícios para reduzir ruído devem atuar retardando o desprendimento da camada limite e controlando sua espessura. De fato, autores sugerem que o bordo serrilhado contribui diminuindo a espessura da camada limite perto do bordo de fuga, reduzindo o ruído de baixas frequências [15].

5.2 Aerofólio 3D

Aqui pretendia-se avaliar o efeito do modelo de turbulência no resultado de ruído obtido.

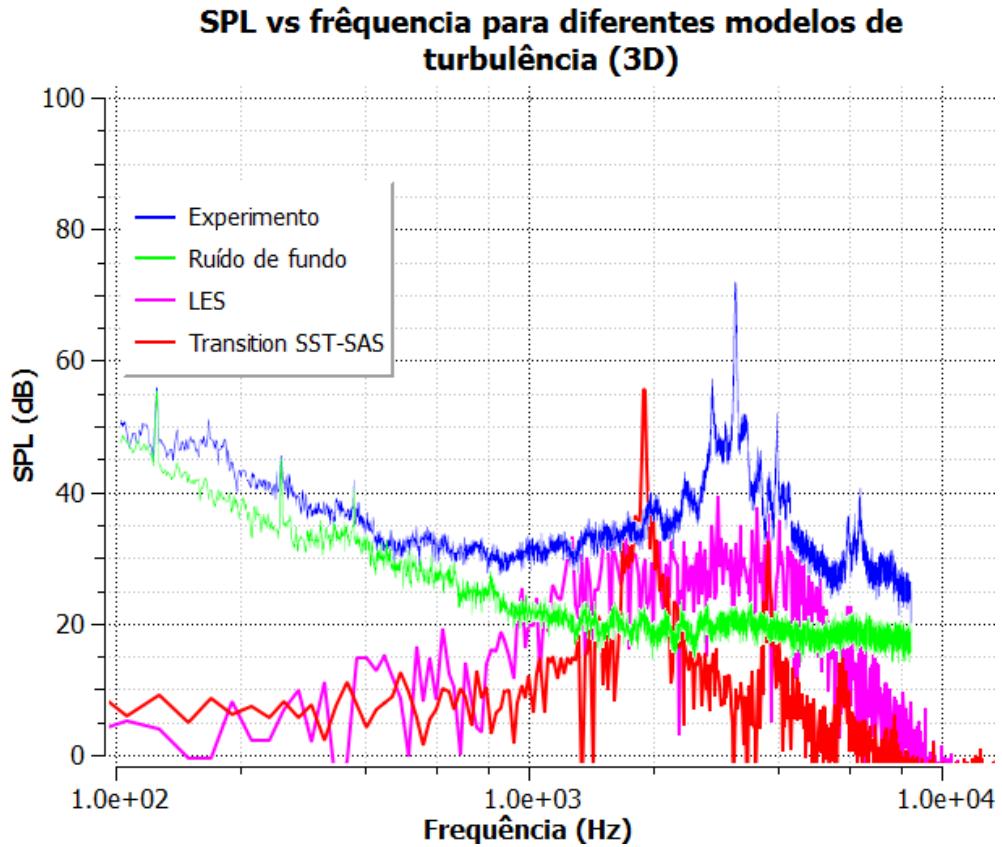


Figura 28 – Comparação de SPL vs frequência entre o resultado experimental (extraído e editado de [34]) e o numérico obtido com diferentes modelos/abordagens de turbulência para caso 3D

A figura 28 mostra que os resultados tanto para LES quanto pra *Transition SST-SAS* estão abaixo da curva experimental, apesar de apresentarem comportamento e tons primários similares aos casos 2D (figura 25). Novamente o modelo *Transition SST-SAS* trouxe resultados mais claros, com picos mais agudos nos tons primários. Acredita-se que a distância vertical entre a curva experimental e a numérica seja devida à presença de ruído de fundo no experimento, algo que não é compensado na análise em CFD. A distância entre as frequências de pico é satisfatória e confirma os comentários feitos anteriormente, mostrando uma boa concordância entre os casos 2D e 3D.

É possível aplicar uma correção à curva para somar os valores do ruído de fundo, o que resultaria em uma curva que seguiria a tendência do ruído de fundo até frequências próximas a 1000Hz , depois acompanharia os picos da curva em vermelho. Entretanto, investigar a fundo as pequenas discrepâncias entre os resultados 3D e experimental foge do escopo deste trabalho. Os resultados e análises aqui discutidos são suficientes para validar o uso do Fluent para se avaliar ruído, e apontam para a viabilidade de se realizar uma análise qualitativa de redução de ruído com a ferramenta.

5.3 Pá de turbina eólica

Nessa etapa oito casos diferentes foram simulados e para cada um analisou-se o ruído medido em quatro posições distintas de microfone.

5.3.1 Resultado comparativo entre os microfones

As figuras a seguir apresentam as curvas de SPL vs. Frequência da pá convencional, em vermelho, e da pá com bordo de fuga serrilhado, em azul, para diferentes microfones. A geometria inicial utilizada foi descrita no item 4.4.1, e a posição dos microfones foi discutida no item 4.3.4.

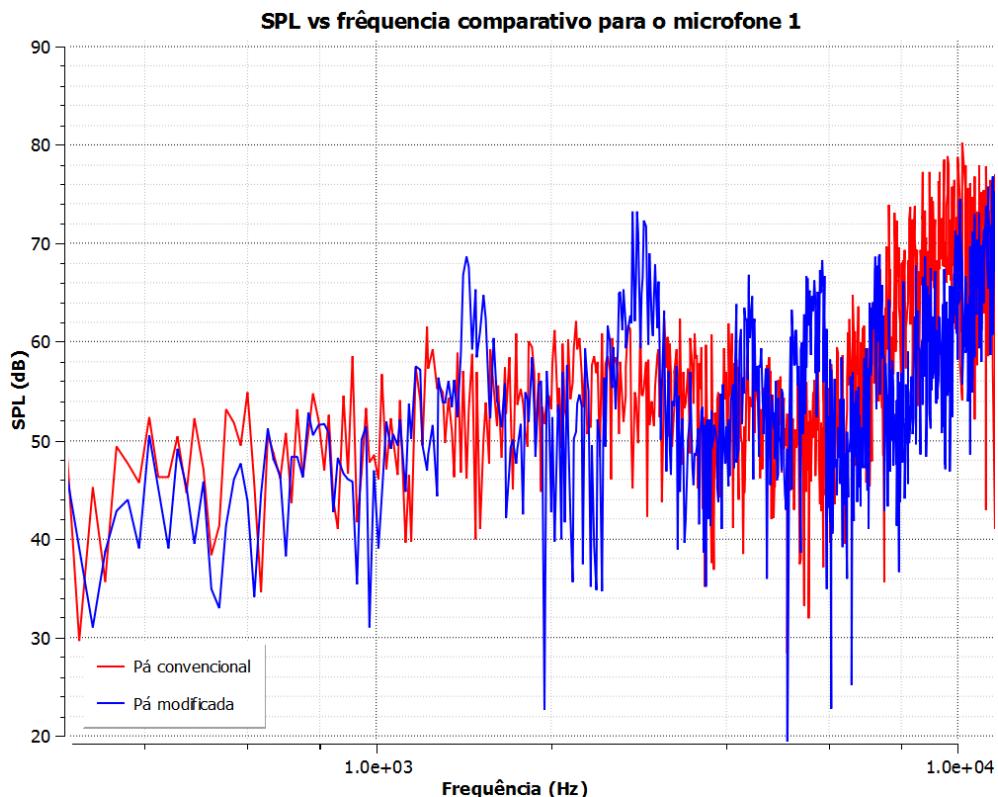


Figura 29 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 1, conforme figura 10

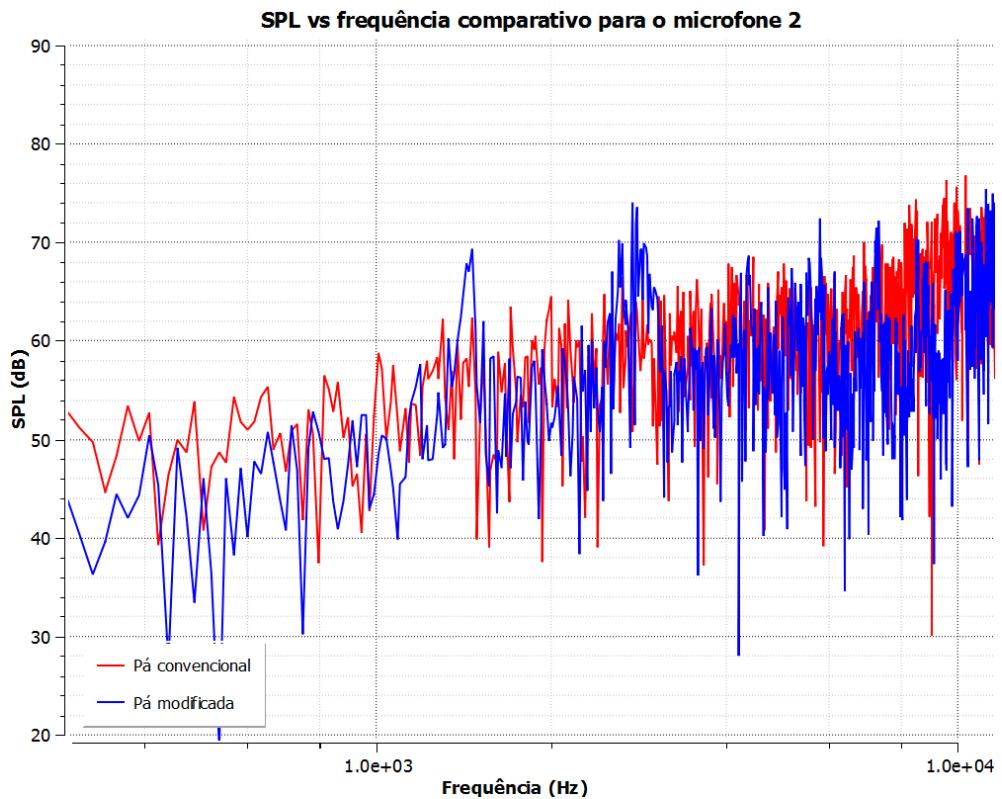


Figura 30 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 2, conforme figura 10

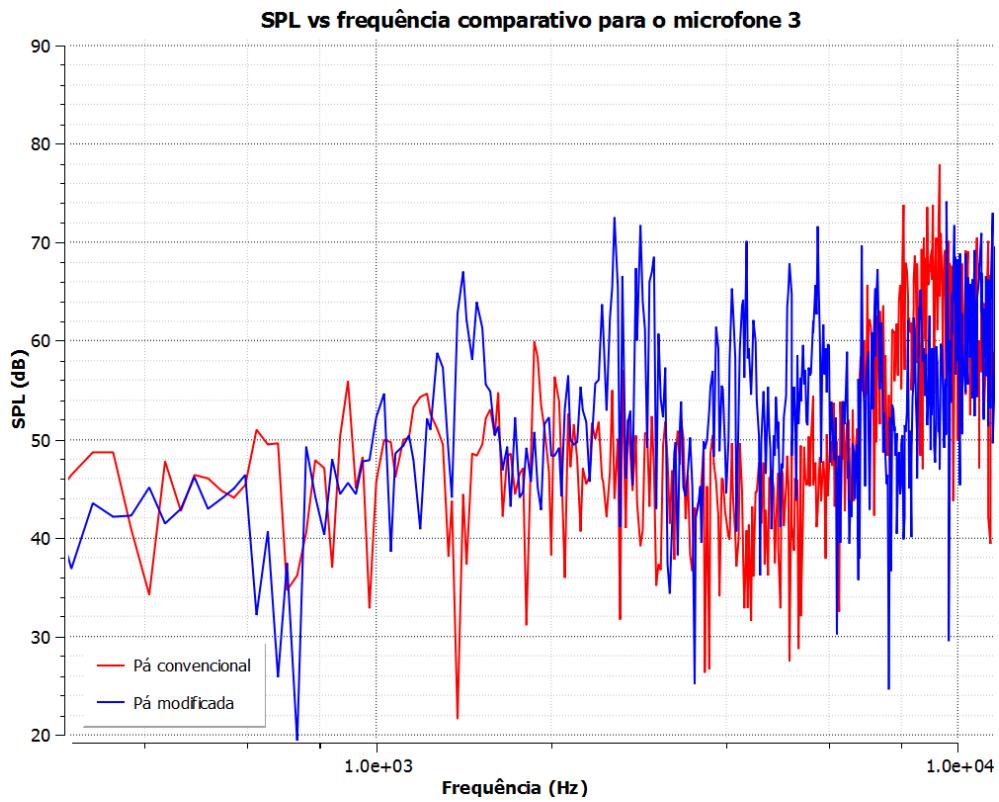


Figura 31 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 3, conforme figura 10

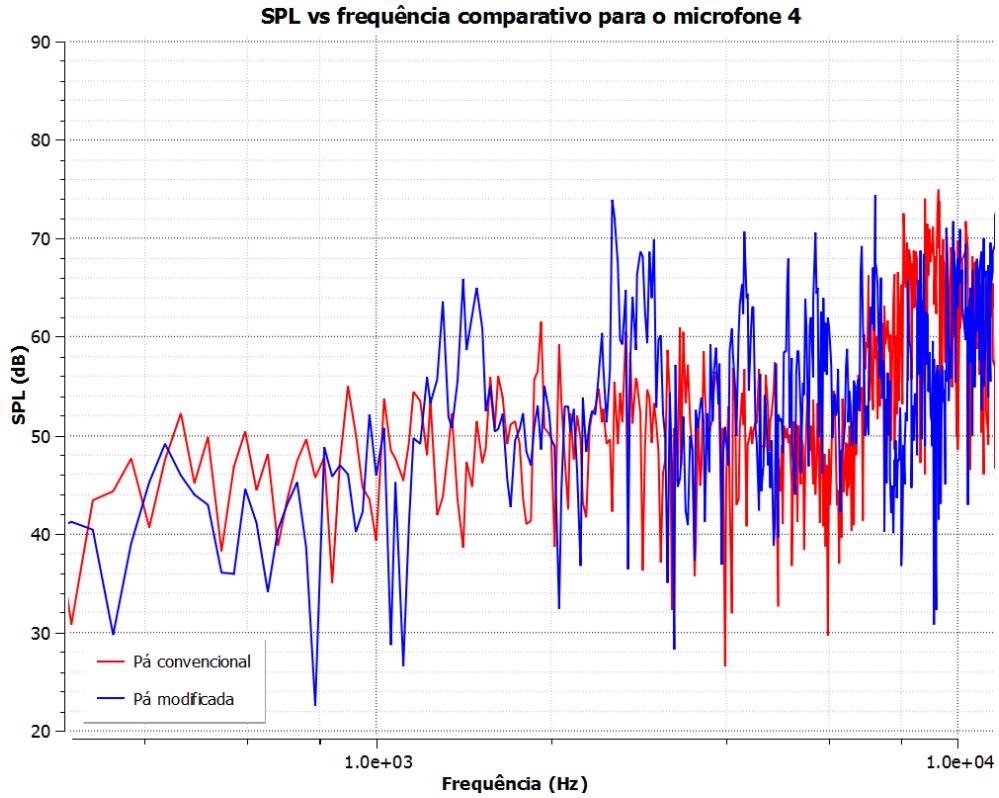


Figura 32 – Comparação de SPL vs frequência entre as pás convencional e modificada para o caso inicial. Ruído avaliado no microfone 4, conforme figura 10

É evidente como a posição do receptor influencia o ruído medido, o que consequentemente afeta a eficácia de redução de ruído da modificação geométrica aplicada. Para a pá convencional, nota-se que em média o ruído medido pelo microfone 2 (figura 30) é maior que o medido pelos microfones 1 (figura 29), 3 (figura 31) e 4 (figura 32), revelando um importante efeito de direcividade na análise acústica. Ademais, nota-se que, apesar de as médias das curvas para a geometria modificada seguirem essa mesma tendência, a eficácia na atenuação de ruído é significativamente abalada pela posição do microfone. A curva 3, por exemplo, apresentou uma piora considerável do ruído medido em praticamente todo o espectro analisado, enquanto o comportamento observado no microfone 2 é de redução nesse espectro, mostrando novamente como a direção de observação é crítica.

Particularmente nas figuras 29 e 30 os resultados são promissores. Houve uma tendência de redução de ruído de baixa frequência (menores que 1000Hz), que é justamente o efeito gerado pela introdução do bordo serrilhado discutido na literatura [15], [18]. Como o ruído em baixas freqüências é um importante fator de irritação [20], o fato de se ter obtido uma redução nessa faixa não apenas indica alinhamento com o observado experimentalmente, como também reforça que se trata de uma modificação

promissora.

Por outro lado, em especial para o microfone 1, observa-se um aumento do ruído tonal, exibindo picos pronunciados em frequências que a pá convencional não apresentava. Para o microfone 2, os picos estão presentes nas mesmas frequências, porém são menos pronunciados em relação tanto à média da curva, quanto à curva não modificada. Isso indica um ponto de ressalva na introdução do serrilhado: apesar de haver uma redução do ruído de baixas frequências, houve um aumento de ruídos tonais, que pode ser um fator agravante na eficácia desse mecanismo de redução dada a subjetividade da percepção sonora.

Há alguns fatores que podem ter influenciado o resultado obtido. A geometria criada, por exemplo, possui cantos vivos, algo não presente na geometria real. Além disso, como já discutido anteriormente, o domínio de simulação contempla apenas a ponta de uma pá e os microfones não estão posicionados exatamente como a norma estipula.

Contudo, acredita-se que a influencia de tais fatores não é significativa para a análise comparativa realizada. A limitação computacional é crítica no estudo aeracústico de turbinas eólicas, limitando tanto o domínio quanto o tempo de simulação. Além disso, a posição do microfone não deverá alterar qualitativamente as curvas de SPL, mas sim apenas deslocá-las para baixo. Mesmo com essas ressalvas, a conclusão de importância da diretividade na análise de ruído em turbinas eólicas é fundamental.

Nos casos apresentados a seguir, optou-se por omitir as figuras de alguns microfones. A discussão para esses outros casos segue no texto.

5.3.2 Estudo de refino de malhas

A figura 33 a seguir ilustra a influência do refino de malha sobre a curva de SPL vs. Frequência para o caso modificado, considerando o microfone 2.

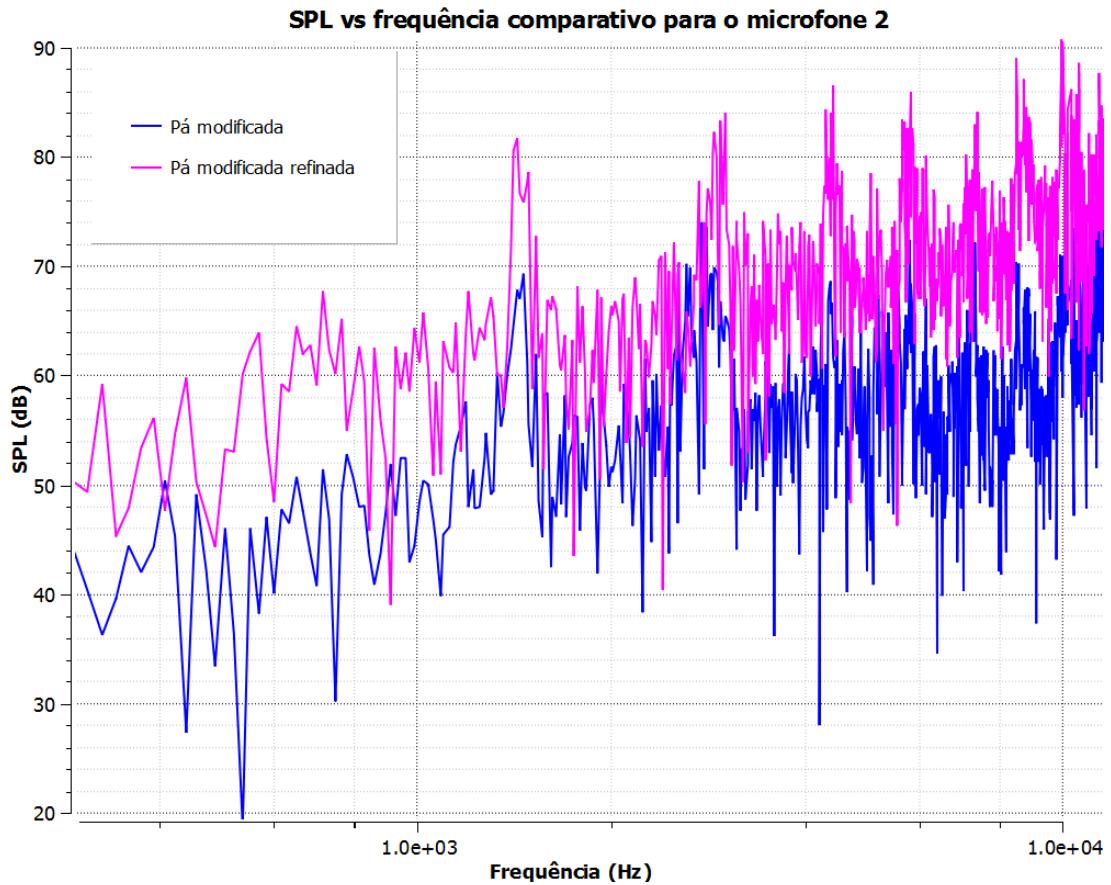


Figura 33 – Comparação de SPL vs frequência entre os casos refinado e não refinado para a pá modificada inicial

Nota-se que, como esperado, o refino de malha não alterou o comportamento geral da curva de ruído, mas sim deslocou a curva para cima em cerca de 10dB e acentuou ligeiramente os picos. Esses ruídos tonais mantiveram-se nas mesmas frequências, sugerindo certa independência da malha entre os dois casos. Essa independência é válida, pois aqui pretende-se apenas fazer uma análise comparativa entre os diferentes casos estudados, de modo que a alteração na posição vertical das curvas não é importante dado que comportamento geral manteve-se o mesmo.

Os mesmos comentários valem para os demais microfones. Para os microfones 1 e 2, o deslocamento vertical é aproximadamente igual. Já para os microfones 3 e 4 esse deslocamento cai pela metade, indicando que caso uma análise quantitativa for desejada, a posição do microfone também influenciará no grau necessário de refino da malha. O comportamento qualitativo de todas as curvas manteve-se semelhante entre os casos.

Como observou-se uma independência entre a malha e o comportamento geral do ruído produzido, o uso de malha refinada não justifica o custo computacional expressi-

vamente maior. Desse modo, os casos discutidos a seguir foram preparados utilizando os mesmos parâmetros de geração de malha que o não refinado.

5.3.3 Estudo de variação de amplitude do serrilhado

As figuras 34 e 35 a seguir apresentam as curvas de SPL vs. Frequência para os dois casos de variação de amplitude do serrilhado. A primeira com metade da amplitude usada no caso inicial, a segunda com o dobro, ambas para o microfone 2.

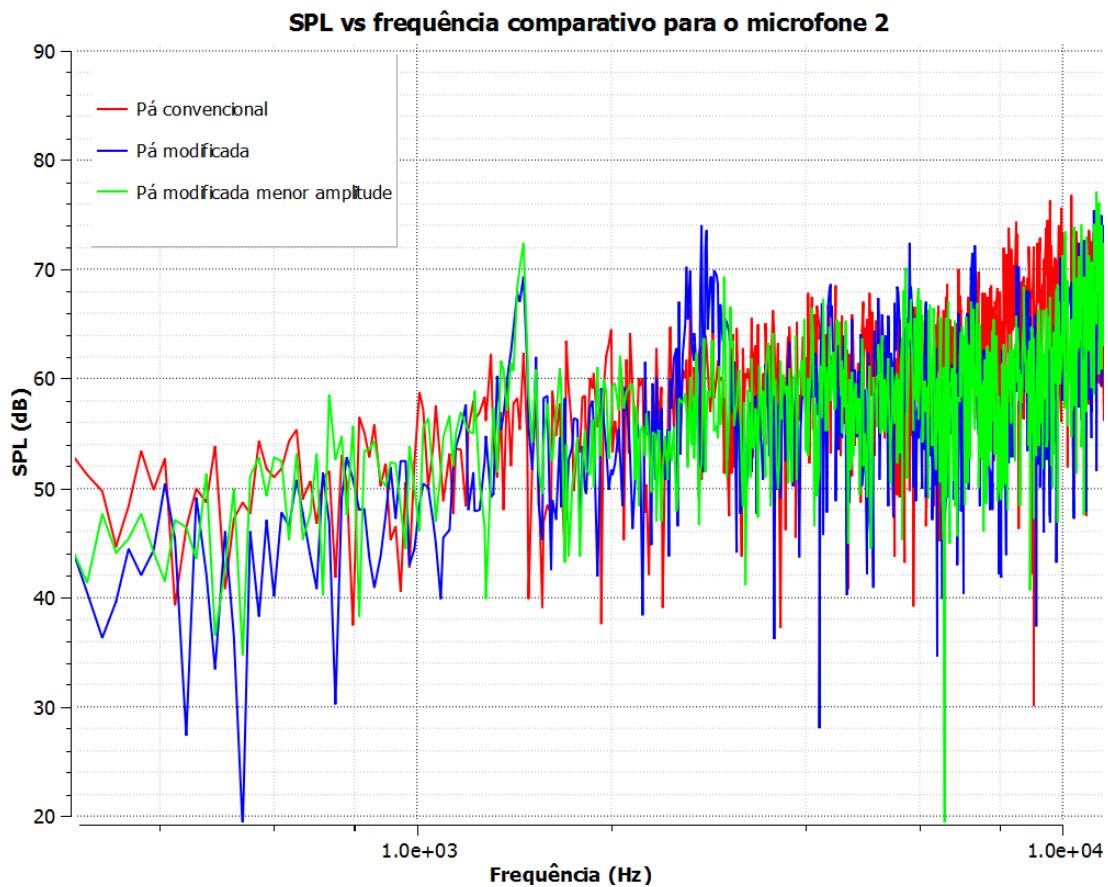


Figura 34 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com metade de amplitude de serrilhado

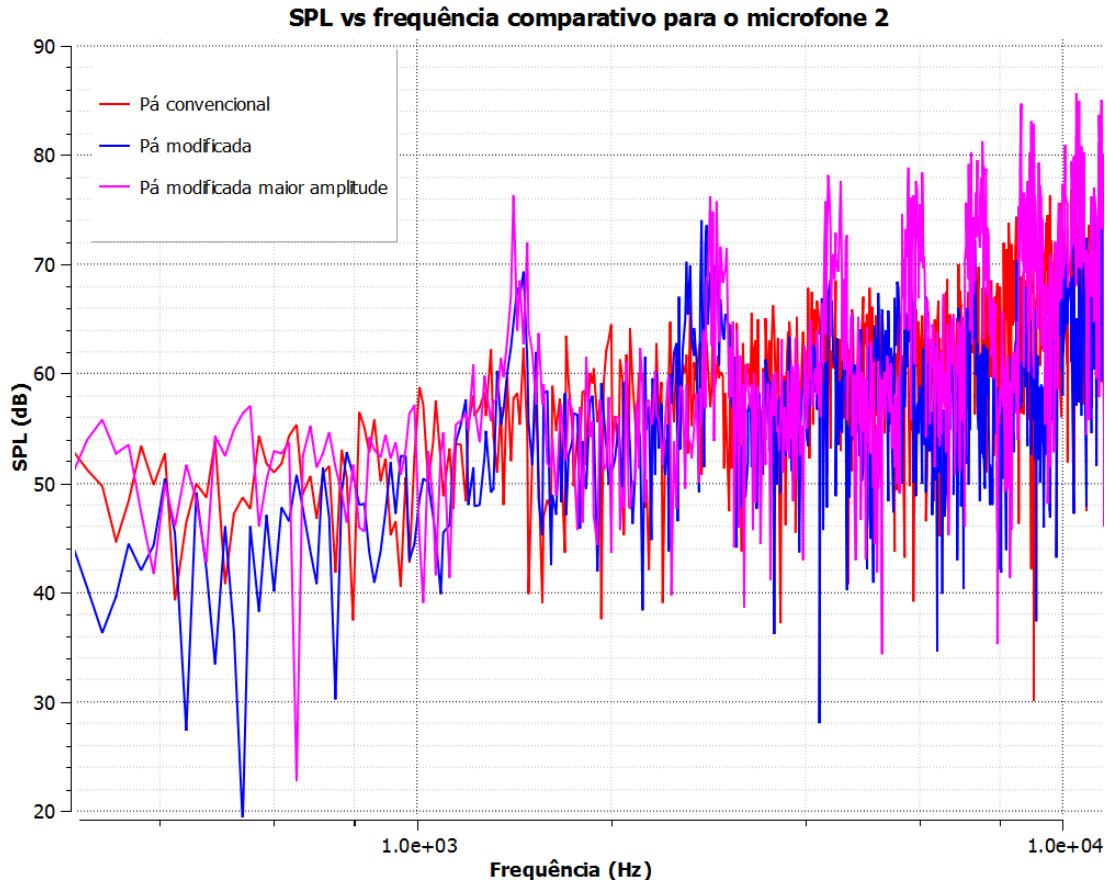


Figura 35 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de amplitude de serrilhado

O caso com metade da amplitude, figura 34, manteve a curva de ruído muito próxima da pá convencional, com exceção da introdução de um tonal próximo a 2000Hz e de uma leve melhora em altas frequências. Quando comparado com a modificação original (curva azul), há uma melhora relativa mais perceptível: atenuação de todos os picos, apesar de uma leve piora em baixas frequências. De modo geral, a redução da amplitude faz um meio termo entre a curva vermelha (pá convencional) e a azul (modificação inicial).

Já o caso com maior amplitude, figura 35, apresentou uma piora no ruído gerado. Comparando com a pá convencional, houve uma aparente piora nos ruídos de baixa frequência e introdução de bastante ruído tonal em diversas frequências ao longo do espectro. Quando comparado com a modificação inicial, a piora é mais clara. Os picos ficaram consideravelmente mais pronunciados e frequentes, além de alargados.

Isso revela que a amplitude tem um efeito importante na produção de ruído tonal. Para pequenas amplitudes, poucos picos aparecem e o caso se aproxima da pá convencional, salvo uma leve melhora. Conforme aumenta-se a amplitude, os picos se tornam

mais pronunciados e gradativamente mais largos, aumentando a produção de ruído.

Os mesmos comentários se aplicam aos demais microfones. De um modo geral, aumentar a amplitude acentua significativamente os picos, enquanto reduzi-la atenua um pouco esses picos, caminhando para a curva da pá convencional. Para alguns microfones o resultado foi pior que para outros, indicando novamente um importante efeito de diretividade na geração de ruído em turbinas eólicas. Particularmente para os microfones 3 e 4, reduzir a amplitude do serrilhado trouxe uma leve alteração na frequência dos picos quando comparado com o caso modificado inicial, deslocando o gráfico para a direita. Aumentando a amplitude, contudo, os trouxe para a posição inicial.

5.3.4 Estudo de variação de comprimento de onda do serrilhado

As figuras 36 e 37 a seguir apresentam as curvas de SPL vs. Frequência para os dois casos de variação de comprimento de onda do serrilhado, para o microfone 2. A primeira com o dobro e a segunda com o triplo, em relação ao caso modificado inicial.

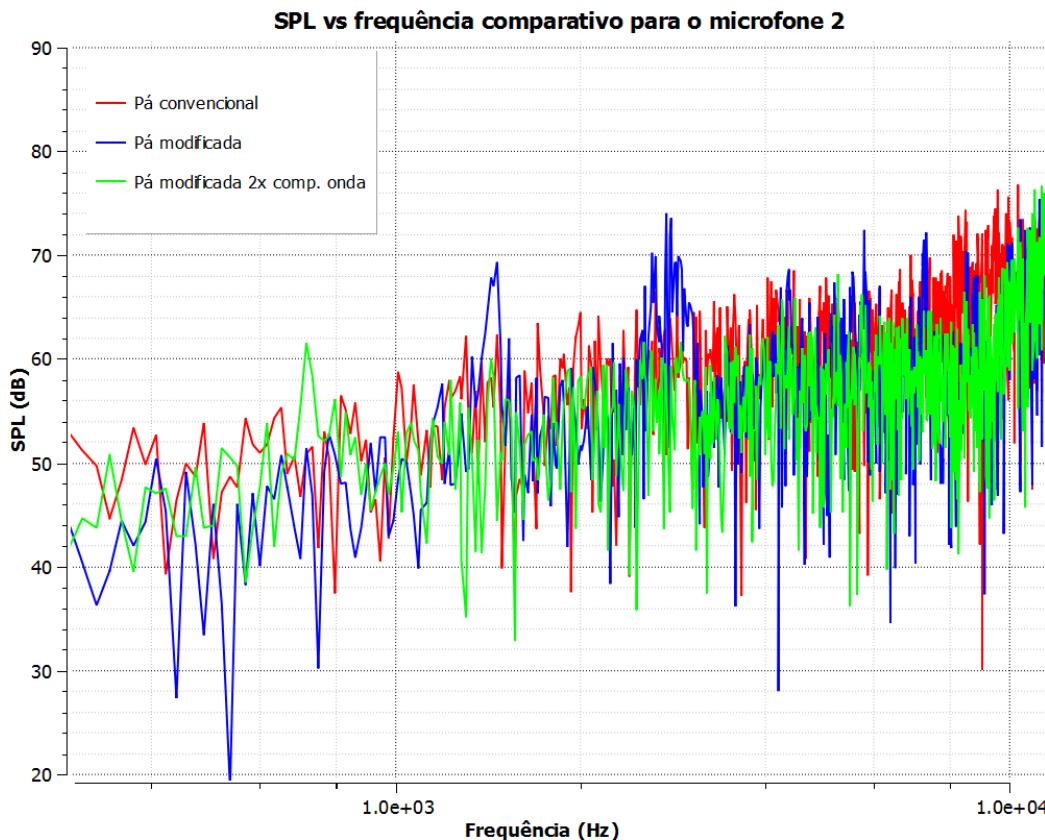


Figura 36 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de comprimento de onda do serrilhado, avaliado no microfone 2

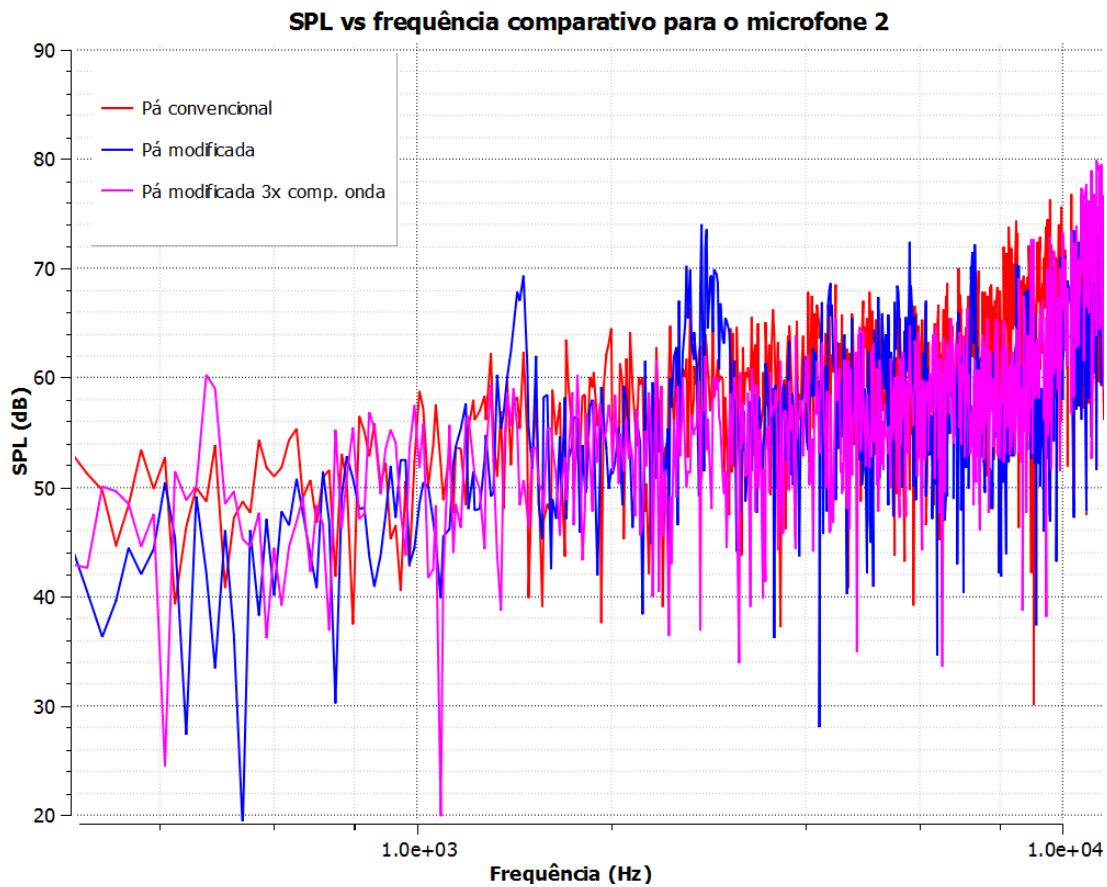


Figura 37 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com triplo de comprimento de onda do serrilhado, avaliado no microfone 2

Para ambos os casos, fica claro que o aumento no comprimento de onda atenuou todos os picos de ruído tonal introduzidos inicialmente pelo serrilhado. Além disso, nota-se uma redução geral do ruído em todo o espectro melhorando o resultado inicial obtido, apresentado no item 5.3.1. Não há melhorias significativas entre o caso com comprimento de onda duas vezes maior e o três vezes maior, de modo que bastando escolher um comprimento de onda maior que o do caso inicial já é possível notar melhora na redução de ruído. Esses mesmos comentários se aplicam ao microfone 1.

Para os microfones 3 e 4, o impacto da escolha do comprimento de onda é mais perceptível, como mostram as figuras 38 e 39 abaixo, ambas para o microfone 3.

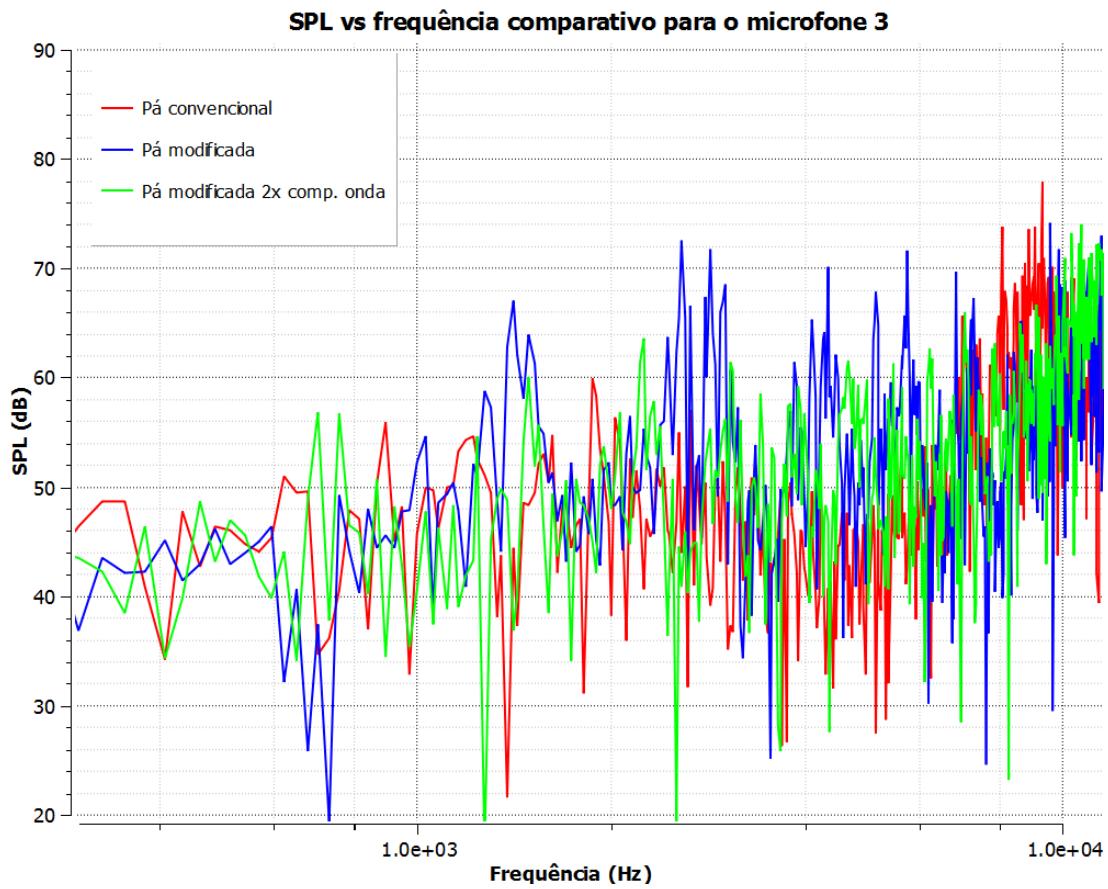


Figura 38 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com dobro de comprimento de onda do serrilhado, avaliado no microfone 3

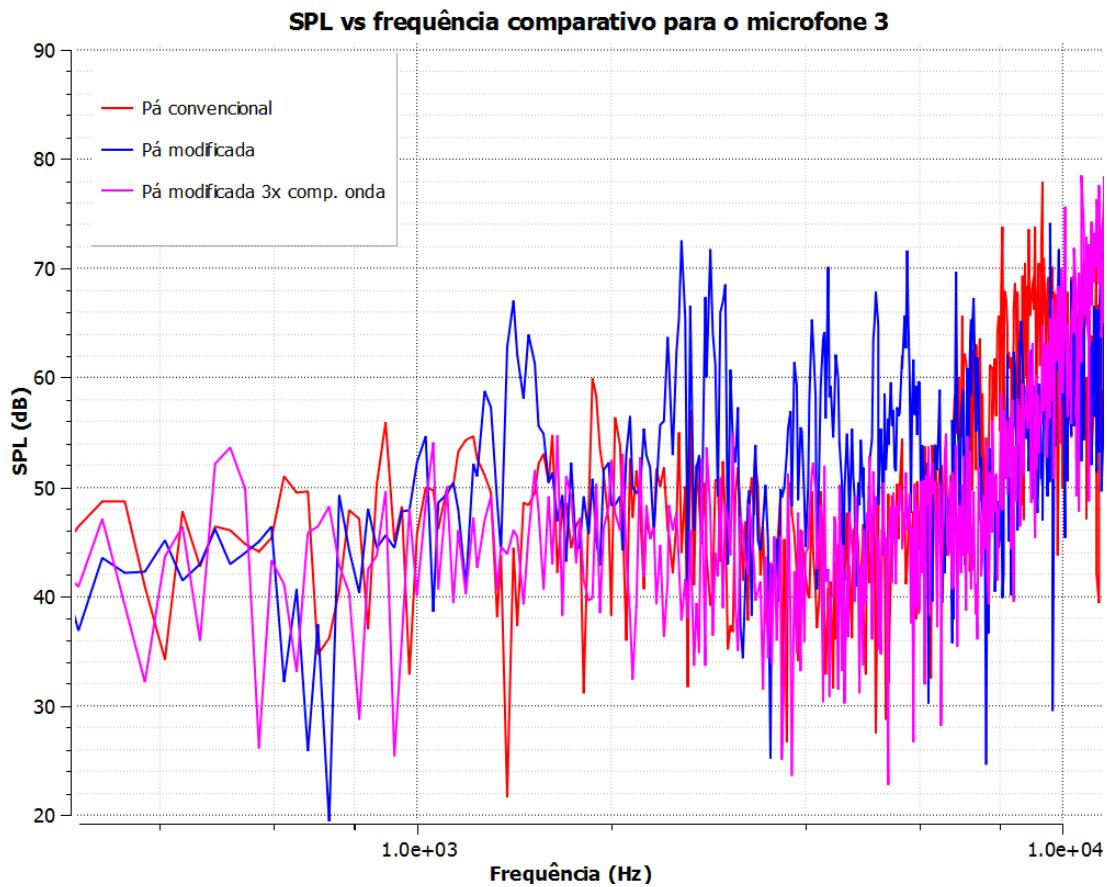


Figura 39 – Comparação de SPL vs frequência entre a pá convencional, o caso modificado inicial e o com triplo de comprimento de onda do serrilhado, avaliado no microfone 3

Nota-se que o aumento do comprimento de onda alterou a posição e a intensidade dos picos presentes em relação ao caso inicial. A maioria desses picos foi atenuada e alguns surgiram em frequências novas. Para o caso com duas vezes comprimento de onda (curva verde), os picos ainda são perceptíveis, apesar de menos intensos. De modo geral, houve uma piora no ruído quando comparado com a pá convencional, mas o resultado é consideravelmente melhor que o da modificação inicial para este microfone. Já para o caso com três vezes comprimento de onda (curva rosa) os picos foram totalmente atenuados e houve até uma melhora na geração de ruído em relação à pá convencional.

Esse resultado explicita ainda mais a importância da diretividade no controle de ruído em energia eólica. Enquanto para os microfones 1 e 2 o acréscimo do comprimento de onda reduz a geração de ruído nos dois casos apresentados, para os microfones 3 e 4 dobrar o comprimento de onda ainda não traz um resultado satisfatório, mas triplicá-lo traz. Portanto, para microfones posicionados aos lados da turbina, o

comprimento de onda influencia bastante o ruído produzido, e uma otimização cautelosa desse parâmetro pode corrigir o aparente efeito negativo que o serrilhado inicial apresentou nessas posições.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O custo computacional de simulações aeroacústicas mostrou-se excessivamente alto. A exigência de modelos de turbulência pesados, de passos de tempo muito reduzidos e malhas refinadas tornam a aplicação detalhada de aeroacústica com CFD em domínios grandes como os de turbinas eólicas praticamente inviável hoje em dia.

Entretanto, os resultados obtidos apontam para um futuro viável de emprego de ferramentas em CFD para análise de geometrias para redução de ruído. Estudos em aerofólios já são bastante numerosos na literatura e indicam em geral sucesso na busca por perfis silenciosos. Os resultados para aerofólios aqui apresentados confirmaram essas tendências e as simulações necessárias mostraram-se viáveis de serem executadas.

O estudo aeroacústico em CFD da geometria de pá é algo pouco encontrado na literatura e também mostrou-se qualitativamente possível, dentro das limitações computacionais. O uso de um domínio completo de pá, abordagem LES de turbulência e malha bastante refinada não foram possíveis de serem implementados, apesar de serem recomendados para bons resultados aeroacústicos. Em contrapartida, o domínio de ponta de pá contempla a principal fonte de ruído em eólicas, o modelo *Transition SST-SAS* mostrou ótimos resultados com aerofólios e o refino de malha foi satisfatório para a precisão desejada na análise comparativa realizada.

A partir dos resultados para a pá eólica apresentados, diversas conclusões importantes foram obtidas. Ficou claro que simplesmente introduzir um bordo de fuga serrilhado não necessariamente irá atenuar o ruído gerado, podendo inclusive piorá-lo. Essa modificação tem um potencial de melhoria, porém o espectro gerado é fortemente influenciado pela direção em que se faz a análise. Consequentemente, a eficácia observada de redução de ruído dependerá de onde as medições forem feitas.

Ademais, alguns parâmetros geométricos do serrilhado do bordo de fuga influenciam mais a geração de ruído do que outros. A amplitude mostrou-se um parâmetro delicado, na medida em que conforme é aumentada, mais intenso se torna o ruído tonal e pior o resultado geral de redução de ruído. Ao mesmo tempo, conforme se reduz a amplitude, mais a curva de SPL caminha para a da pá sem modificação, desfazendo portanto o efeito da modificação. Desse modo a amplitude é um parâmetro que se deve ter bastante cuidado ao escolher, e seu impacto varia levemente conforme a posição de medição.

Por outro lado, o comprimento de onda mostrou uma tendência clara de redução

de ruído quando aumentado, particularmente atenuando os picos de ruído tonal, além de apresentar uma redução geral do ruído produzido, revelando a importância desse parâmetro. A posição em que se faz análise é ainda mais crítica para o comprimento de onda. Em algumas posições, dobrar o comprimento de onda trouxe um resultado pior que o da pá convencional, enquanto triplicá-lo trouxe uma melhoria expressiva. Enquanto isso, em outras o aumento inicial desse parâmetro logo trouxe melhorias. De modo geral, o aumento do comprimento de onda impacta positivamente a redução de ruído em turbinas eólicas, dentro da faixa de valores avaliada neste trabalho.

Com isso fica claro o importante efeito de diretividade da análise acústica em eólicas, bem como a maneira com que cada parâmetro contribui para o ruído. Para maximizar o efeito de redução de ruído em turbinas eólicas é necessário, portanto, uma otimização cuidadosa da geometria do serrilhado, levando-se em conta a posição em que se fará a medição.

É importante lembrar que a metodologia adotada possui limitações. Apesar do emprego do *MFR* (referencial móvel, discutido no item 4.3.2), O movimento angular da pá não é contabilizado para o pós processamento de aeroacústica, mas sim apenas para a solução do escoamento. Desse modo, o ruído é emitido pela pá como se ela estivesse parada, não contabilizando efeitos de afastamento/aproximação da fonte emissora conforme a pá se move. Além disso, o domínio criado contempla apenas os 14m finais de uma pá originalmente com 45m, e os microfones não estão posicionados conforme a norma. Tais aproximações limitam análises adicionais mais profundas sem que haja dados experimentais para validar os resultados, mas não afetam as conclusões comparativas discutidas.

Como pontos futuros para prosseguir no estudo desse tema, sugere-se:

- Simular casos cruzados de variação de amplitude e comprimento de onda do serrilhado, buscando identificar como os efeitos individuais de cada parâmetro se somam para compor o ruído final produzido;
- Simular casos com os microfones posicionados no chão, visando se adequar mais à norma IEC 61400-11 [42]. Para tal, deve-se simular o escoamento por pelo menos três vezes mais passos de tempo, o que implica um custo computacional consideravelmente mais elevado. Não é esperado que isso trará melhorias no resultado de redução de ruído da modificação, mas sim que a curva mantenha o mesmo comportamento, levemente atenuada. Mesmo assim, trata-se de um teste válido a ser feito;
- Posicionar os microfones em posições típicas de residências, buscando-se determinar o impacto da alteração geométrica em situações mais realistas. Com

isso espera-se investigar a fundo a conclusão de que cada parâmetro geométrico reduz mais o ruído em um determinada direção, e endereçar um estudo personalizado de como otimizar os parâmetros geométricos para cada posição individual de turbinas em cenários reais;

- A falta de dados experimentais para uma geometria igual à utilizada em CFD impede a validação do modelo criado. Desse modo, um estudo experimental realizado em conjunto com um estudo numérico, com mesma geometria e condições seria de grande adição para o tema;
- Um estudo em escala utilizando um túnel de vento anecoico, aliado a um estudo numérico, também pode ajudar a validar os valores de nível de ruído obtidos. Com uma prototipagem facilitada, pode-se inclusive testar inúmeras variações geométricas diferentes;
- Busca por novas geometrias para redução de ruído e sua implementação em CFD, particularmente as bio-inspiradas. Avaliar também a influência de pequenas alterações geométricas na diretividade do ruído para essas diferentes modificações.

REFERÊNCIAS

- 1 IPCC. *Summary for Policymakers*. Genebra, Suíça, 2014. 2–26 p. [III](#), [1](#)
- 2 GADONNEIX, P. et al. World Energy Resources 2013. *World Energy Council Conseil Mondial De L'Energie*, p. 29, 2013. [1](#)
- 3 International Energy Agency. *Energy Statistics*. [S.I.], 2016. [1](#)
- 4 HARE, W. L. *A safe landing for the climate*. [S.I.], 2009. 12–29 p. [2](#)
- 5 TESKE, S. *Energy [R]Evolution - a Sustainable World Energy Outlook*. [S.I.], 2012. 340 p. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/Campaign-reports/Climate-Reports/Energy-Revolution-2012/>. Acesso em: 16 de outubro de 2016. [2](#)
- 6 UNEP Frankfurt School of Finance and Management and Bloomberg New Energy. *Global Trends in Renewable Energy*. Frankfurt, Alemanha, 2016. 84 p. [III](#), [2](#), [3](#)
- 7 AHMED, N. A.; CAMERON, M. The challenges and possible solutions of horizontal axis wind turbines as a clean energy solution for the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 439–460, 2014. ISSN 13640321. [3](#), [4](#), [6](#)
- 8 International Energy Agency. *Renewables energy outlook*. [S.I.], 2012. 210–242 p. Disponível em: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2012/WEO2012_Renewables.pdf. Acesso em: 16 de outubro de 2016. [3](#)
- 9 GWEC. *Global Wind Report 2015 - Global Wind Energy Council*. Bruxelas, Bélgica, 2015. 75 p. Disponível em: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf. Acesso em: 16 de outubro de 2016. [III](#), [4](#)
- 10 OERLEMANS, S.; SIJTSMA, P.; Méndez López, B. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, v. 299, n. 4-5, p. 869–883, 2007. ISSN 10958568. [4](#)
- 11 ROGERS, A.; MANWELL, J.; WRIGHT, S. *Wind turbine acoustic noise*. 2006. 1–26 p. [4](#)
- 12 DOOLAN, C. J.; MOREAU, D. J.; BROOKS, L. A. Wind turbine noise mechanisms and some concepts for its control. *Acoustics Australia*, v. 40, n. 1, p. 7–13, 2012. ISSN 08146039. [4](#), [5](#), [6](#)
- 13 BREEZE, P. Wind Power. *Power Generation Technologies*, v. 1, n. 5, p. 223–242, 2014. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080983301000119>. Acesso em: 17 de outubro de 2016. [4](#)

- 14 BERG, F. van den. Wind turbine noise: an overview of acoustical performance and effects on residents. *Proceedings of Acoustics 2013*, n. Novembro, p. 1–7, 2013. Disponível em: [⟨http://docs.wind-watch.org/AAS-2013-p108-van-den-Berg.pdf⟩](http://docs.wind-watch.org/AAS-2013-p108-van-den-Berg.pdf). Acesso em: 17 de outubro de 2016. 4, 5
- 15 OERLEMANS, S. et al. *Reduction of Wind Turbine Noise Using Optimized Airfoils and Trailing-Edge Serrations*. Holanda: National Aerospace Laboratory NLR, 2009. 536–570 p. 5, 43, 48
- 16 MOREAU, D. J.; BROOKS, L. A.; DOOLAN, C. J. *Flat plate self-noise reduction at low-to-moderate Reynolds number with trailing edge serrations*. 2011. 5
- 17 GRUBER, M. Airfoil noise reduction by edge treatments. 2012. 5
- 18 BARONE, M. F. *Survey of techniques for reduction of wind turbine blade trailing edge noise*. 2011. 5, 6, 48
- 19 AVALLONE, F.; PROBSTING, S.; RAGNI, D. Three-dimensional flow field over a trailing-edge serratıon and implications on broadband noise. *Physics of Fluids*, v. 28, n. 11, 2016. ISSN 10897666. Disponível em: [⟨http://dx.doi.org/10.1063/1.4966633⟩](http://dx.doi.org/10.1063/1.4966633). 5, 26
- 20 DOOLAN, C. A review of wind turbine noise perception, annoyance and low frequency emission. *Wind Engineering*, v. 37, p. 97–104, 2013. 5, 48
- 21 OERLEMANS, S.; FUGLSANG, P. *Low-noise wind turbine design*. 2012. 1–23 p. III, 5, 6, 22
- 22 DOOLAN, C. et al. *Trailing edge noise production , prediction and control*. 2012. 1–13 p. 6
- 23 SARRADJ, E.; GEYER, T. *Noise Generation by Porous Airfoils*. [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 6
- 24 DOWLING, A. P.; FFOWCS WILLIAMS, J. E. *Sound and sources of sound*. Chichester, England: Ellis Horwood Limited, 1983. 8, 10
- 25 MCKEOWN, S. A. *Mechanical Analysis of Electronic Packing Systems*. New York, US: Marcel Bekker Inc., 1999. 10
- 26 MARCHI, C. H.; SCHNEIDER, F. A. *Introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional, cap. 1*. Curitiba: [s.n.], 2002. Disponível em: [⟨http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM701/2003_2/cap_01.pdf⟩](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM701/2003_2/cap_01.pdf). Acesso em: 3 de dezembro de 2016. 10
- 27 HANNA, K. *CFD Breakes the \$ Billion Barrier!* Mentor Graphics, 2015. Disponível em: [⟨https://blogs.mentor.com/khanna/blog/2015/03/26/cfd-breaks-the-billion-barrier/⟩](https://blogs.mentor.com/khanna/blog/2015/03/26/cfd-breaks-the-billion-barrier/). Acesso em: 4 de dezembro de 2016. 11
- 28 ORSZAG, S. *Lattice Boltzmann Method for Fluid Dynamics*. s.d. Disponível em: [⟨http://qmcd09.physics.wustl.edu/Presentations/qmcd09Talks/orszag.pdf⟩](http://qmcd09.physics.wustl.edu/Presentations/qmcd09Talks/orszag.pdf). Acesso em: 4 de dezembro de 2016. 11

- 29 EXA CROP. *PowerACOUSTICS*. Disponível em: <<http://exa.com/en/product/analysis-tools/poweracoustics-noise-simulation>>. Acesso em: 4 de dezembro de 2016. 11
- 30 MECHANICAL ENGINEERING RESEARCH LABS OF BOSTON UNIVERSITY. *Acoustics and Vibrations*. Disponível em: <<http://www.bu.edu/eng/departments/me/research/acoustics-and-vibrations/>>. Acesso em: 9 de maio de 2017. 12
- 31 ANSYS, INC. *Advanced ANSYS CFD Aeroacoustics*. ANSYS, Inc., 2013. Disponível em: <https://support.ansys.com/AnssysCustomerPortal/en_us/Knowledge%20Resources/Tutorials%20&%20Training%20Materials/Training%20Files/Aeroacoustics+using+ANSYS+Fluent+14.5>. Acesso em: 9 de maio de 2017. 12, 13, 16, 18, 19, 36
- 32 WAGNER, C. A.; HüTTL, T.; SAGAUT, P. *Large-Eddy Simulation for Acoustics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. ISBN 9780521871440. 12, 16
- 33 UOSUKAINEN, S. *Foundations of acoustic analogies*. Helsinki, Finlândia, 2011. 121 p. 13
- 34 ARCONDOULIS, E. J. G.; DOOLAN, C. J.; ZANDER, A. C. Airfoil noise measurements at various angles of attack and low Reynolds number. *Proceedings of Acoustics 2009*, n. Novembro, p. 1–8, 2009. III, IV, 14, 15, 17, 19, 20, 30, 31, 37, 38, 41, 44
- 35 ANSYS, INC. *ANSYS Fluent User's Guide*. ANSYS, Inc., 2016. Disponível em: <<https://support.ansys.com/AnssysCustomerPortal/>>. 15, 16, 19, 21
- 36 ORSELLI, R. M. *Investigação numérica de escoamento e ruído gerado em corpos rombudos prismáticos*. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 16, 21
- 37 GIRET, J.-C.; SENGISSEN, A. Prediction of the sound generated by a rod-airfoil configuration using a compressible unstructured LES solver and a FW-H analogy. p. 1–18. 18
- 38 CHRISTOPHE, J.; SCHRAM, C.; TOURNOUR, M. Aeroacoustic Prediction and Measurements of Jet-Airfoil Interaction Noise Flow modeling. p. 1232–1235, 2009. 18
- 39 TAM, C. K. W.; JU, H. Aerofoil tones at moderate reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics* (2012), Cambridge University Press, Estados Unidos, p. 536–570, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/jfm.2011.465>>. Acesso em: 9 de maio de 2017. 20, 37
- 40 NOGUEIRA, L. W. *Otimização acústica e análise numérica do escoamento ao redor de um conjunto cilindro-placa separadora*. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015. 21

- 41 PHELPS, C.; SINGLETON, J. *Wind Turbine Blade Design*. Masters Report, Sibley School of Engineering. Cornell University, s-d. 22
- 42 INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. *IEC 61400-11*: Wind turbine generator systems - part 11: Acoustic noise measurement techniques. Geneva, 2006. 52 p. III, 24, 25, 59
- 43 HANSEN, C. H. Fundamentals of acoustics. *World Health Organisation Special Report, S64*, Federal Institute of Occupational Safety and Health, Alemanha, p. 23–52, 2012. Disponível em: <http://www.who.int/occupational_health/publications/noise1.pdf>. Acesso em: 9 de maio de 2017. 30