



## **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DA ESTRUTURA DE UM TÚNEL AERODINÂMICO PARA DIFERENTES ROTAÇÕES DO MOTOR**

**Pedro Augusto Marques Sanches, pedroamarques.s@gmail.com<sup>1</sup>**

**Rodrigo Borges Santos, RODRIGOB SANTOS@ufgd.edu.br<sup>1</sup>**

**Augusto Salomão Bornschlegell, AUGUSTOSALOMAO@ufgd.edu.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, Km 12 - Unidade II

**Resumo.** Túneis de vento são equipamentos utilizados para ensino, pesquisa e realização de experimentos nas mais diversas áreas da engenharia. Devido à sua construção e às máquinas rotativas responsáveis pela criação do escoamento dentro do túnel, o mesmo está sujeito a perturbações dinâmicas advindas do motor e ventilador. Dependendo da intensidade, estas perturbações são capazes de atrapalhar e até mesmo impossibilitar a obtenção de resultados satisfatórios em estudos realizados na seção de testes. Diante disso, este trabalho tem como objetivo o estudo da evolução, em diversas faixas de rotação do motor, das vibrações transmitidas através da estrutura metálica até a seção de testes de um túnel de vento modelo AA-TVSH1. As medições foram obtidas por meio de um acelerômetro controlado por um Arduino, registradas, pós processadas e plotadas por softwares open source, como RealTerm e QtiPlot. Através dos resultados obtidos no domínio do tempo e da frequência conclui-se que a maneira com que o motor está fixo na mesa não é a ideal e favorece a transmissão das vibrações ao longo da estrutura. Dessa maneira soluções como o isolamento dos corpos de prova da parede do túnel e melhorias na fixação do motor se mostram necessárias.

**Palavras chave:** Vibração. Túnel aerodinâmico. Instrumentação.

### **1. INTRODUÇÃO**

Túneis aerodinâmicos são ferramentas multiuso dedicadas, principalmente, para o estudo de escoamentos externos. Problemas aerodinâmicos práticos, desde aerodinâmica veicular até perfis de pá de turbinas eólicas, podem ser estudados em túneis aerodinâmicos compactos fazendo uso do conceito de similaridade. Problemas fundamentais também podem ser explorados, como por exemplo, o estudo de turbulência em escoamentos.

Em todas as diferentes frentes de trabalho, é importante que o resultado observado na seção de testes seja independente de perturbações externas. Neste sentido, o conhecimento do comportamento da própria ferramenta (túnel) se torna fundamental para a compreensão e interpretação adequada dos resultados obtidos.

O escoamento no interior de túneis aerodinâmicos é, segundo Gopal, *et al.* (2017), usualmente gerado por ventiladores acoplados a motores elétricos de alta potência. De acordo com Adams (2001), todo eixo sujeito ao movimento de rotação apresenta algum tipo de vibração, com pelo menos uma componente de frequência a cada revolução, pois a construção de um eixo de massa completamente balanceada é impossível. Esta vibração é a principal fonte de perturbações em túneis aerodinâmicos.

Dentro deste contexto, o presente trabalho traz como motivação o estudo do comportamento dinâmico para diferentes rotações do túnel aerodinâmico modelo AA-TVSH1 instalado no LARAVA (Laboratório de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) da UFGD. Mais precisamente, o estudo do nível de vibração na região da seção de testes para diferentes faixas de velocidade do túnel.

### **2. METODOLOGIA**

#### **2.1. Túnel de Vento**

O túnel de vento utilizado no estudo é o modelo AA-TVSH1, visto na Fig. 1, fabricado pela empresa Aeroalcool Tecnologia Ltda. Este é um túnel de vento subsônico horizontal de circuito aberto, onde o ar é admitido pelo bocal de entrada devido a sucção gerada pela hélice localizada na parte posterior. Com o objetivo de alcançar baixos níveis de turbulência e direcionar o escoamento, o ar é orientado na direção longitudinal com o auxílio de uma colmeia. Adicionalmente, a velocidade na entrada é homogeneizada com duas telas de Nylon. Seguidamente o escoamento é acelerado na contração até atingir a velocidade desejada na seção de ensaios, onde o ar encontra-se nas condições adequadas para a realização das experiências. Finalmente o ar é desacelerado novamente no difusor e expelido fora do túnel. O conjunto completo encontra-se montado sobre uma bancada móvel com estrutura de aço que permite a

mobilidade. A dimensão total do túnel é de 6,75 metros de comprimento, 2,13 metros de altura e 1,3 metros de largura, pesando 430 kg. A Fig. 2 apresenta um desenho esquemático do túnel e a Tab. 1 tem a descrição dos componentes.

Figura 1. Túnel de vento AA-TVSH1



Figura 2. Desenho esquemático do Túnel

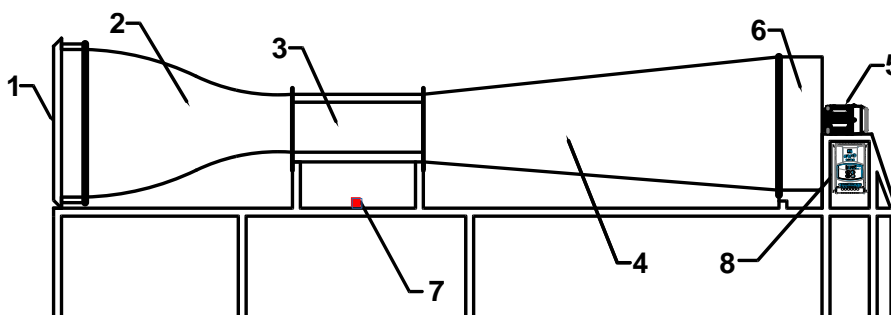


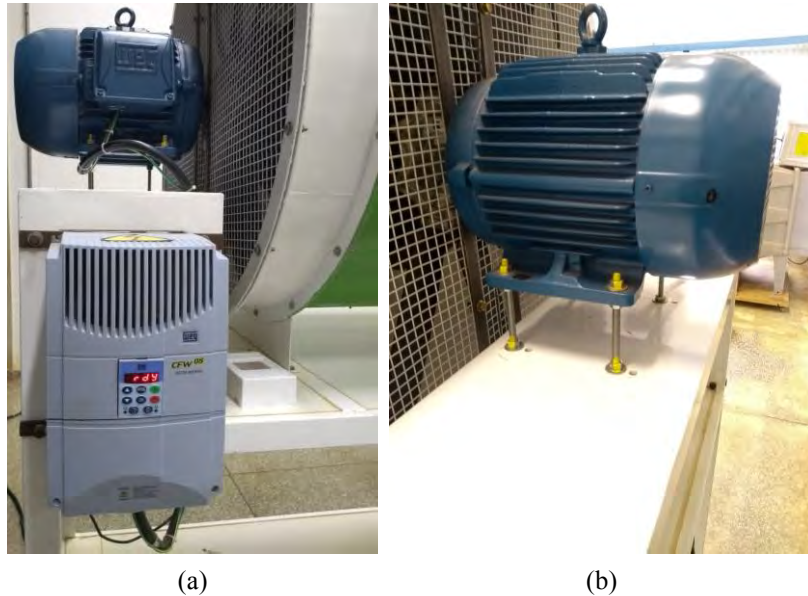
Tabela 1. Descrição dos componentes

Componente	Descrição	Componente	Descrição
1	Alisador de fluxo, com bocal de entrada, colmeia e duas telas uniformizadoras	5	Motor elétrico
2	Contração, com uma relação em área de 4,5:1	6	Hélice de oito pás
3	Seção de ensaios de 462 mm x 462 mm x 1200 mm (Largura, altura, comprimento)	7	Acelerômetro
4	Difusor com relação em área de 3:1	8	Inversor de Frequência

O motor elétrico responsável pelo fluxo de ar no túnel é um WEG modelo W22 Plus trifásico, com potência nominal de 10 HP e rotação máxima de 1760 RPM. O mesmo se encontra fixo na estrutura do túnel por meio de 4 barras roscadas, travadas em ambas as extremidades por meio de porcas, como visto na Fig. 3b. O motor é alimentado e controlado por meio de um inversor de frequência modelo CFW 08 da marca WEG. Este modelo de inversor conta com a opção de controle vetorial, onde a operação do inversor é otimizada para o motor em uso obtendo-se um melhor desempenho em termos de torque e regulação de velocidade. Dessa maneira, o controle das rotações das pás pode ser feito de maneira precisa e confiável sem a necessidade de instrumentos de medição e controle, além do próprio inversor. Esta confiabilidade foi confirmada por meio de medições realizadas com um tacômetro ótico apontado para as pás do ventilador acoplado ao motor, que apresentou um erro fixo de 1 RPM ao longo de toda a faixa de operação do motor,

quando comparado ao valor apresentado pela tela do inversor. Tanto o motor quanto o inversor estão representados na Fig. 3a. Outra configuração importante do inversor é a sua rampa de aceleração e desaceleração. Neste experimento, ambas foram definidas em 60 segundos, ou seja, o motor levará este tempo para acelerar de 0 RPM até 1760 RPM, sua velocidade máxima. E de maneira análoga, ele levará o mesmo tempo para desacelerar desde sua velocidade máxima até 0 RPM. Este tempo foi definido de modo que possíveis fenômenos causados pela aceleração e desaceleração do motor e das pás pudessem ser registrados pelos acelerômetros.

Figura 3. a) Motor elétrico e inversor de frequência; b) Sistema de fixação do motor



## 2.2. Instrumentação

Para o registro das acelerações, um acelerômetro foi instalado na estrutura metálica do túnel, alinhado com a seção média da seção de testes, de modo a registrar as vibrações produzidas pelo motor e pelas pás, que são transmitidas pela estrutura até a seção de testes. O eixo x do sensor ficou alinhado com a seção transversal do túnel, o eixo y ficou alinhado com a seção longitudinal e o eixo z foi alinhado verticalmente. Dessa maneira foi possível medir e caracterizar a influência das vibrações em outros experimentos aerodinâmicos realizados no túnel.

As acelerações foram medidas por um sensor MPU6050. Este sensor combina, na mesma placa, um giroscópio de 3 eixos, um acelerômetro de 3 eixos e um chip DMP (Digital Motion Processor™) que é responsável pelo processamento das informações brutas lidas pelos instrumentos. Neste estudo, foram utilizados dados advindos apenas do acelerômetro. O sensor foi configurado para operar com uma escala de  $\pm 2g$ , a mínima possível, resultando na máxima resolução para este caso. A calibração indicada no manual do sensor é de  $16384 \text{ LSB/g}$ , ou seja, o menor valor de aceleração que o sensor consegue medir é  $1/16384 \text{ g}$ , dessa maneira uma resolução de aproximadamente  $6,10E-5 \text{ g}$  foi obtida. LSB, ou Least Significant Byte, é a unidade com que o sensor reporta suas medições ao controlador. Uma função muito útil proporcionada pelo DMP é o travamento dos eixos do acelerômetro. Com ela ativada, independente da inclinação inicial do sensor, os eixos de medição (x, y, z) são mantidos estacionários ao longo de todo o experimento. Isto é possível por meio da utilização dos dados do giroscópio em conjunto com o acelerômetro e o processamento do DMP. Para que estas funções sejam executadas, e para garantir a confiabilidade nas medições, o sensor foi colocado em uma superfície plana e calibrado seguindo as recomendações de sua biblioteca de calibração.

O protocolo de comunicação deste sensor é o chamado I2C. Para a leitura deste protocolo, bem como a interface entre o PC e o sensor, foi utilizado um controlador Arduino Uno R3. O controlador foi programado para registrar as acelerações lidas pelo acelerômetro, o momento em que o inversor foi acionado e desacionado, e o instante de tempo em que cada medição foi registrada. Os dados relativos ao giroscópio foram ignorados para evitar a sobrecarga no sistema de processamento do controlador. Por conta das limitações apresentadas pelo Arduino, a frequência máxima de amostragem das acelerações atingida foi de  $100 \text{ Hz}$ . O registro do acionamento e o desacionamento do inversor de frequência foi feito por meio da leitura de um relê do inversor conectado à entrada digital do controlador, que é ativado assim que o motor começa sua aceleração e desativado quando o mesmo reduz sua velocidade até  $0 \text{ RPM}$ . A Fig. 4 é um desenho esquemático com todos os equipamentos presentes no sistema de medição. Descrições dos componentes podem ser encontradas na Tab. 2.

Figura 4. Desenho esquemático do sistema de medição

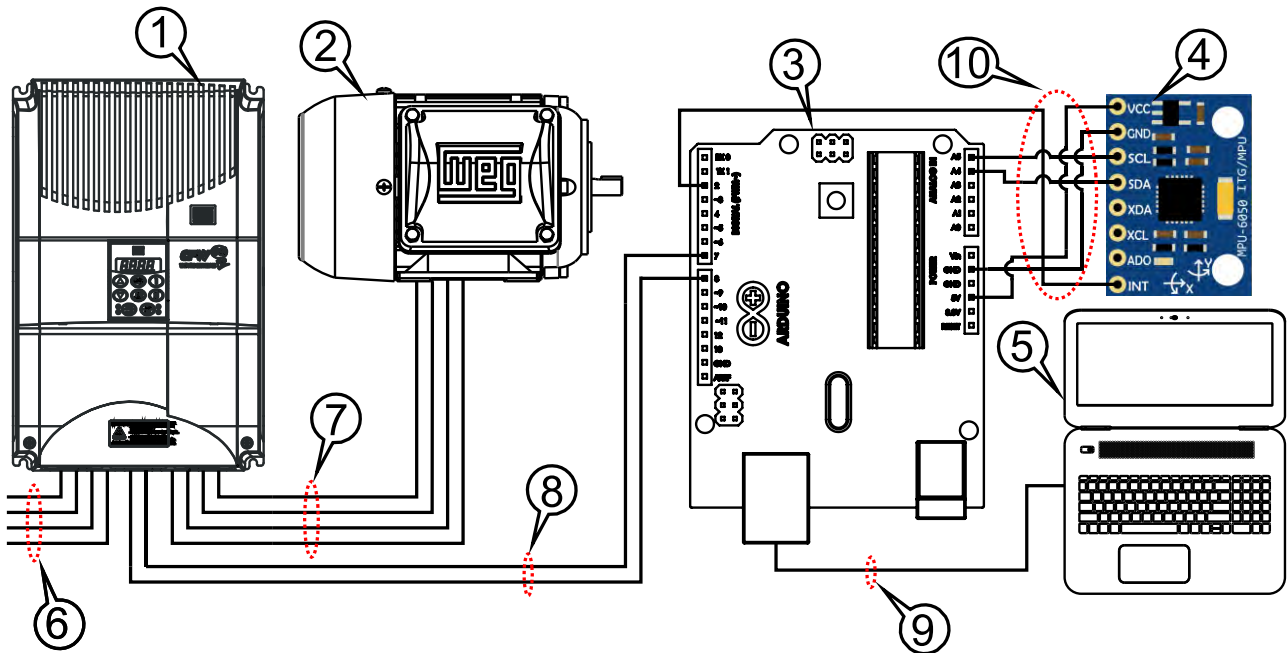


Tabela 2. Descrição dos componentes

Componente	Descrição	Componente	Descrição
1	Inversor de Frequência WEG CFW-08	6	Alimentação Trifásica + Terra do inversor
2	Motor Elétrico WEG W22 Plus 10 HP	7	Alimentação Trifásica + Terra do motor
3	Arduino Uno R3	8	Conexão do relé do inversor
4	Sensor MPU6050	9	Conexão USB
5	Computador	10	Interface e conexões I2C

A interface entre o controlador Arduino e o PC é feita por meio do protocolo USB, através do qual são transmitidos os dados de aceleração e acionamento do inversor de frequência. Para o registro destes dados foi utilizado o software de código aberto RealTerm, versão 2.0.0.70, o qual oferece uma interface poderosa e intuitiva para a interação com os protocolos TCP e Serial. Além da comunicação com o Arduino, este software também tem a opção de registrar os dados que estão sendo recebidos pelo terminal, e salvar os mesmo em um arquivo separado por vírgula que pode ser pós-processado por outros softwares.

O experimento, repetido em intervalos de 100 RPM, começando em 100 RPM e indo até 1500 RPM, consistiu dos seguintes passos:

1. Configuração do RPM desejado no inversor;
2. Ligar o sistema de medição (Sensor e Arduino) e iniciar o registro dos dados no software;
3. Acionamento do inversor;
4. Aguardar o RPM do motor se estabilizar no valor configurado após a rampa de aceleração;
5. Após 60 segundos na faixa de RPM constante, desacionar o inversor;
6. Após a desaceleração total do motor, desligar o sensor e salvar os dados coletados;
7. Repetir o processo para os próximos valores de rotação.

### 2.3. Tratamento de sinal

Com os dados registrados e salvos em formato csv (Arquivo de texto com valores separados por vírgula), os mesmos foram importados no software QtiPlot, versão 0.9.8.9, para serem pós processados. O QtiPlot é um software livre, de licença GPLv2, utilizado para análise de dados e produção de gráfico bidimensionais ou tridimensionais. Contando com uma interface robusta, opção de importação e exportação de dados e gráficos em diversos formatos, e uma extensa gama de ferramentas matemáticas para análise dos dados, este software se mostrou adequado às necessidades deste estudo.

Por conta de características elétricas próprias do sensor, o datasheet do mesmo recomenda que se aguarde alguns segundos após a energização e conexão com o controlador para que suas medições sejam estabilizadas. No software

QtiPlot, os dados foram convertidos a partir dos sinais elétricos brutos reportados pelo controlador, para  $m/s^2$ , de acordo com a calibração indicada no manual do sensor, de  $16384 \text{ LSB/g}$  e adotando um valor de  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

Com o valor conhecido da rampa de aceleração e desaceleração configurado em 60 segundos no inversor, e conhecendo-se o instante exato em que o inversor foi acionado e desacionado, os valores de rotação (RPM) instantâneos foram calculados pelo software para cada instante de tempo. Além disso, os dados de tempo decorrido foram convertidos de milissegundos para segundos, para que a coerência com as unidades de aceleração seja mantida.

### 3. RESULTADOS

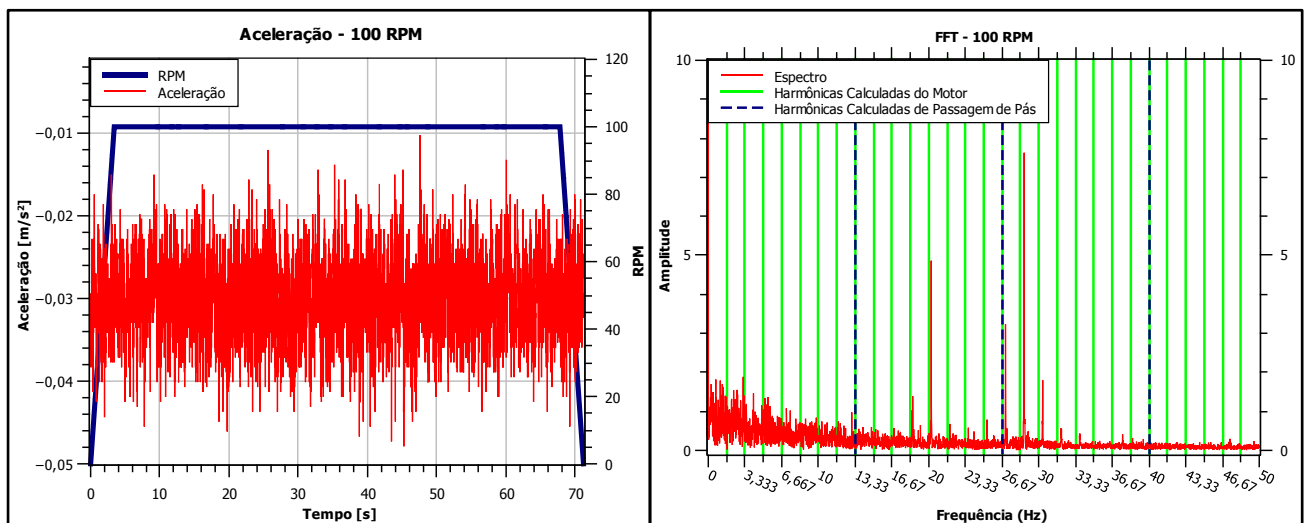
Os dados de aceleração no eixo z do sensor e rotação (RPM) do motor em função do tempo foram plotados para todas as faixas de velocidade registradas no experimento, ou seja, de 100 RPM a 1500 RPM em passos de 100 RPM. Porém, visto que algumas faixas de rotação apresentaram respostas semelhantes quando analisadas no domínio do tempo e da frequência, são apresentados resultados para as rotações de 100, 200, 500, 1000 e 1500 rpm.

Comparando os resultados dos três eixos do sensor no tempo, é percebida uma maior amplitude no valor da aceleração medida no eixo z (eixo vertical). Isto é esperado, pois, a maioria da massa do túnel repousa ao longo do eixo longitudinal da estrutura, o qual é o mais longo, de modo que os efeitos da flexão ao longo deste eixo do túnel serão mais evidentes. Dessa maneira, as medições de aceleração em x e y do acelerômetro se mostraram redundantes, apresentando frequências semelhantes aos outros eixos.

Então, a partir das respostas temporais aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e obteve-se resultados no domínio da frequência. Os gráficos temporais são apresentados de forma a visualizar os dados de aceleração juntamente com a rotação instantânea do motor. Já os gráficos em frequência mostram o espectro da resposta, as harmônicas esperadas do motor (linhas contínuas verticais) e, também, as frequências de passagens das pás (linhas verticais pontilhadas). Com isso, possibilitando uma melhor análise e entendimento dos resultados obtidos. De acordo com Adams (2001), as frequências harmônicas são esperadas quando o objeto de estudo envolve máquinas rotativas com pás acopladas no eixo. Essas frequências são causadas pelo próprio movimento do eixo, de maneira que seus valores são dados por  $(n \times rpm)/60 \text{ Hz}$ , com  $n$  sendo números inteiros que representam as harmônicas. A frequência de passagem de pás, apesar de apresentar amplitude muito menor, segundo Adams (2001), é determinada pela frequência de rotação multiplicada pelo número de pás acopladas ao eixo, no caso do túnel em estudo, oito pás. Os gráficos de espectro foram produzidos com dados das regiões em que a rotação do motor está constante, para que fenômenos presentes nos instantes de aceleração e desaceleração não influenciem nas demais frequências.

Nos dados apresentados pela Fig. 5, que foram obtidos a 100 RPM, ainda não é possível perceber a olho nu algum efeito das rotações do motor nas medições no tempo, porém se analisarmos o gráfico das frequências, podemos observar que mesmo a baixas rotações, alguns picos de frequência coincidem com harmônicas do motor e com as frequências de passagem de pás, resultado mais evidente na faixa entre  $13 \text{ Hz}$  e  $40 \text{ Hz}$ .

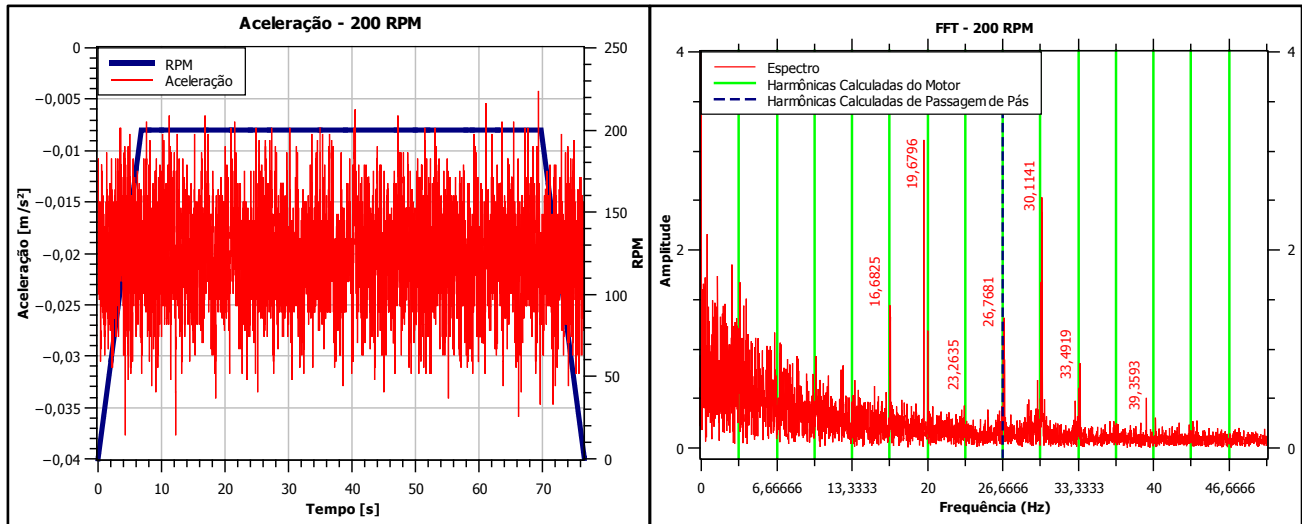
Figura 5. Aceleração, RPM e frequências relativas à 100 RPM



Nos gráficos da Fig. 6, relativos a 200 RPM, é possível perceber o mesmo comportamento anterior, porém, agora os picos no espectro se mostram mais evidentes. Além disso, estes picos coincidem de maneira ainda mais coerente com as frequências calculadas de rotação e passagem de pás para esta faixa de rotação. Devido ao espaço maior oferecido neste gráfico, foi possível a adição de cursores em vermelho, que correspondem aos valores medidos nos picos. Isto faz a comparação com os valores calculados, encontrados no eixo x do gráfico, mais intuitiva. Assim como antes, os picos mais

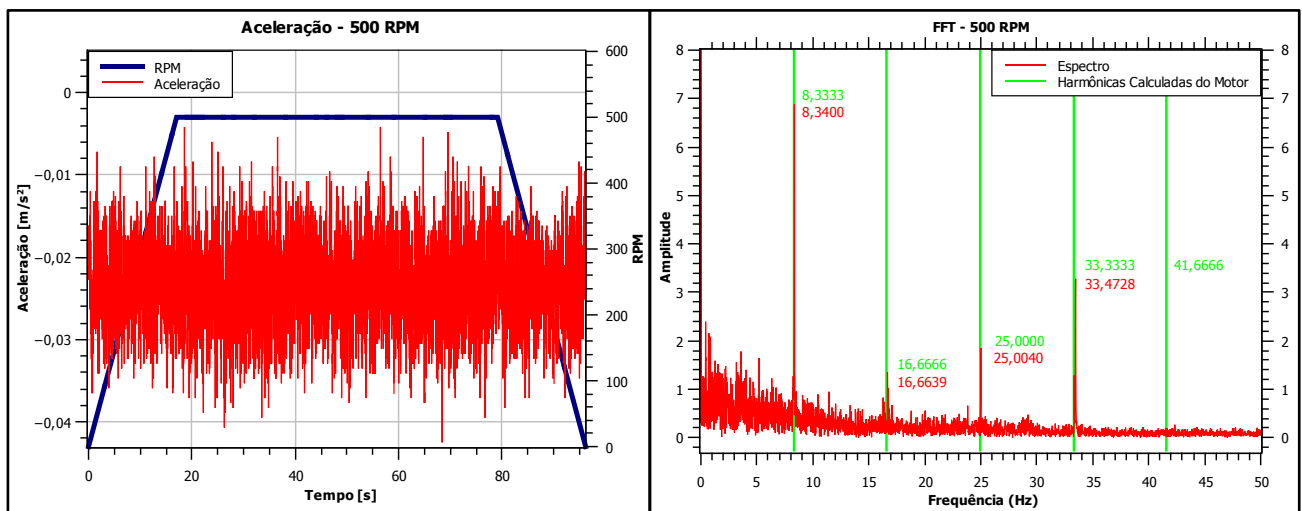
evidentes se encontram na faixa entre 13 Hz e 40 Hz e ainda não é possível perceber alteração do sinal no tempo com apenas uma análise visual.

Figura 6. Aceleração, RPM e frequências relativas à 200 RPM



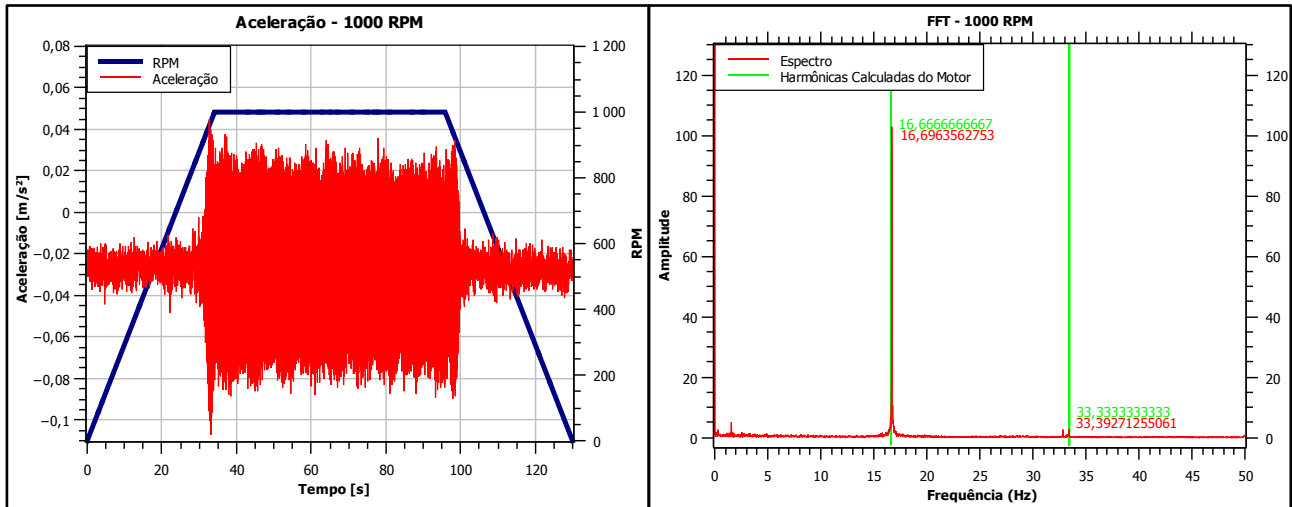
Nos dados relativos à faixa de velocidade de 500 RPM, apresentados na Fig. 7, já é possível perceber um aumento na amplitude do sinal no tempo como um todo. Nesta faixa de velocidade, o sensor foi capaz de capturar o pico fundamental de rotação da máquina, ou seja, o primeiro pico que corresponde à frequência de rotação do eixo. Além disso, a frequência fundamental de rotação da máquina se sobressai às outras frequências. Os demais picos de frequência se diferem dos gráficos anteriores, pois passam a ter uma amplitude muito maior do que a amplitude apresentada pelo ruído. Novamente o sensor não foi capaz de detectar frequências dominantes acima de 40 Hz.

Figura 7. Aceleração, RPM e frequências relativas à 500 RPM



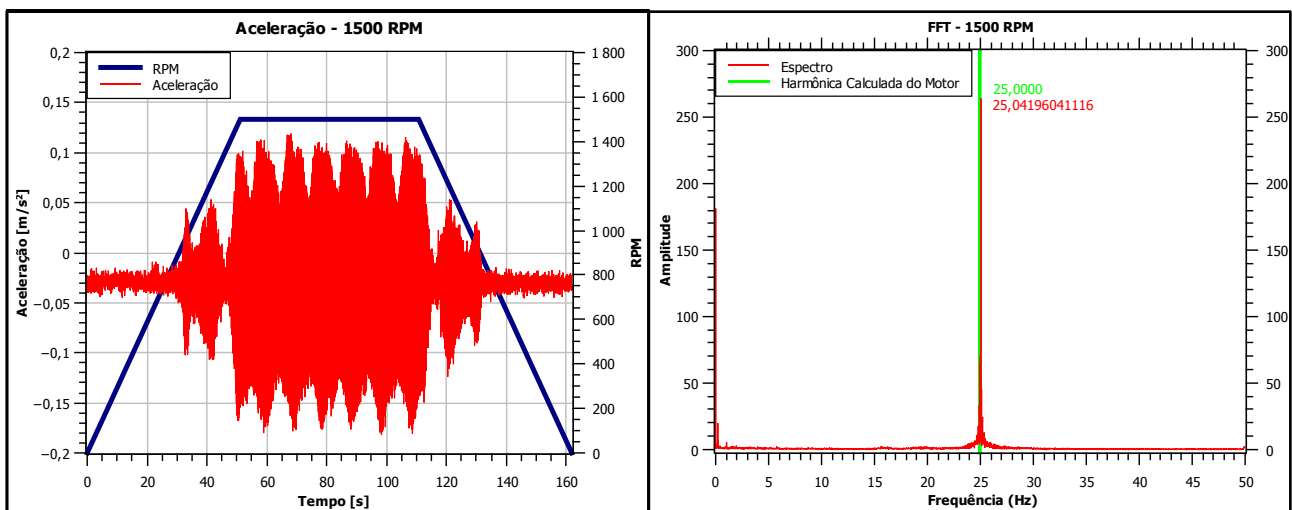
Na faixa de 1000 RPM, observada na Fig. 8, há uma mudança significativa nos dados em função do tempo, de maneira que é possível estabelecer uma clara distinção entre o sinal de aceleração enquanto o motor está acelerando ou desacelerando, e o sinal quando a velocidade do motor é constante. Nesta velocidade, a frequência fundamental de rotação apresenta um salto de amplitude quando comparada às outras faixas de velocidade, ou até mesmo à sua primeira harmônica. Para este caso, a primeira frequência de passagem de pás seria de aproximadamente 133,3333 Hz, o que está além da capacidade de medição dos instrumentos utilizados no estudo.

Figura 8. Aceleração, RPM e frequências relativas à 1000 RPM



Por último, na faixa de RPM máxima atingida durante o experimento, presente na Fig. 9, é percebido novamente o drástico aumento de amplitude nos valores de aceleração na faixa de RPM constante no domínio do tempo. Porém, há também algumas oscilações de amplitude que se formam na área de aceleração e desaceleração e que não surgiram nas velocidades inferiores. Para esta faixa de velocidade, o sensor é capaz de captar apenas a frequência fundamental de rotação e nenhuma de suas harmônicas. De qualquer maneira, o dado experimental se mostrou coincidente com o valor calculado da frequência fundamental.

Figura 9. Aceleração, RPM e frequências relativas à 1500 RPM



#### 4. CONCLUSÕES

Analisando os dados e os gráficos apresentados, conclui-se que as vibrações produzidas pela rotação do motor elétrico e das pás que promovem o fluxo de ar dentro do túnel são transmitidas pela estrutura do túnel e impactam a seção de testes. Este impacto foi observado desde baixas rotações até a velocidade máxima, de maneira que um controle fino da velocidade não mitigaria o problema.

O fato das vibrações serem transmitidas até a seção de testes evoca um grande empecilho para os estudos que utilizam o túnel como ferramenta, pois, os locais para engaste de corpos de prova se encontram na parede da seção de testes, fazendo com que o próprio corpo de prova receba vibrações advindas do motor e pás. Até mesmo experimentos puramente aerodinâmicos, que não envolvam estudos vibracionais, são afetados pelas perturbações no escoamento causadas pelas vibrações indesejadas.

Assim, uma possível saída para a fixação de corpos de prova seria a utilização de um suporte externo ao túnel, de maneira que o corpo de prova fique isolado da parede do túnel ou de qualquer outra estrutura que esteja sujeita às vibrações

do motor e pás. Esta alternativa já está sendo estudada e implementada por outros projetos que estão sendo desenvolvidos na UFGD.

Outra maneira de se reduzir a influência de vibrações do motor no resto da estrutura seria o estudo e o desenvolvimento de outro sistema de fixação para o motor, pois a solução original de fábrica, como evidenciado na discussão, não é satisfatória. O motor é rigidamente fixado à mesa, o que não promove nenhum meio de isolamento para as vibrações oriundas da rotação do conjunto motor-ventilador.

Um diferencial a ser notado é a utilização de softwares de código livre para o registro e processamento dos resultados, além do controlador Arduino utilizado para a interface entre o sensor e o PC, que também é *open source*. Dessa maneira fica demonstrada a possibilidade de que comunidades acadêmicas utilizem ferramentas robustas, confiáveis e de baixo custo para produções de alta qualidade.

De maneira geral o sistema de medição se mostrou adequado à uma análise preliminar das vibrações as quais a estrutura do túnel está sujeita. Para experimentos futuros, uma maior e mais estável taxa de aquisição é interessante e possibilita uma maior gama de detalhes e frequências que podem ser estudadas. Outro quesito que requer maior atenção é o pós-processamento e filtragem dos dados, visto que na maioria dos resultados podem ser observadas tendências e efeitos de ruídos diversos, o que atrapalha a percepção de certos fenômenos tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte prestado pelo corpo técnico dos laboratórios da FAEN-UFGD durante a montagem e execução dos experimentos. Os agradecimentos também são direcionados a UFGD, que proporcionou a publicação deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Adams, M. L., 2001. *Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting*. Marcel Dekker, New York, United States of America.
- Gopal, Kumar, L. S., Reddy, V. J., Rao, M. U. M., PavanKumar, K., 2017. "Vibration Isolation of the Wind Tunnel Drive System". In *Materials Today: Proceedings*. Vol. 4, n. 8, p. 7778–7792 <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.113>>

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.