

ANÁLISE DE SOLUÇÕES ESTRUTURAIS PARA MINIMIZAR A VIBRAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO AEROALCOOL MODELO AA-TVSH2

Gabriel Ferreira da Paixão¹, gabrielferreiradapaixao@discente.com.br
Marlipe Garcia Fagundes Neto¹, marlipe@ufg.br

¹ Universidade Federal de Goiás Campus Samambaia, Av. Esperança, s/n - Chácaras de Recreio Samambaia, Goiânia – GO, CEP 74.690-900

Resumo. O presente trabalho objetiva minimizar as vibrações do Túnel de Vento da Escola de Engenharia Mecânica, Elétrica e da Computação da Universidade Federal de Goiás, modelo AA-TVSH2 fabricada pela AeroAlcool, quando em funcionamento. Para que o objetivo seja cumprido com sucesso foi necessário modelar o túnel de vento em um programa de desenho assistido por computador, simular o modelo em funcionamento, averiguar a compatibilidade de movimento entre equipamento e modelo simulado por meio de métodos de análise numérica, localizar as regiões mais críticas para assim apontar melhorias no túnel de vento. Ao final de todo este processo os movimentos do modelo e do túnel de vento se mostraram similares e meios de minimizar a quantidade de pontos críticos na estrutura foram elaborados.

Palavras chave: Modelagem. Simulação. Minimizar. Criticidade. Estrutura.

Abstract. The present work aims to minimize the vibration of the Wind Tunnel of the Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação of Universidade Federal de Goiás, model AA-TVSH2 manufactured by AeroAlcool, when in operation. In order for the objective to be successfully accomplished, it was necessary to model the wind tunnel in a computer-aided design program, simulate that model in operation, verify the movement compatibility between equipment and simulated model through numerical analysis methods, locate the more critical regions in order to point out improvements in the wind tunnel.

Keywords: Modeling. Simulation. Minimize. Criticality. Structure.

1. INTRODUÇÃO

O túnel de vento é um equipamento utilizado em estudos de engenharia que envolvem aerodinâmica de corpos, a Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás dispõe do modelo AA-TVSH2 fabricado pela empresa AeroAlcool [1]. Para cumprir com a respectiva funcionalidade, tal dispositivo conta com um motor de 12,5 CV, rotação nominal de 1750 rpm e 9 hélices em uma de suas extremidades para gerar o escoamento que atuará sobre o objeto de estudo que estará na câmara de ensaios de 305x305x600mm [1]. Apesar do baixo nível de intensidade de turbulência garantida pelos fabricantes [1] quando a velocidade do vento é de 10m/s, foi encontrada uma faixa de velocidades em que os níveis são elevados [2], ou seja, acima de 10 m/s. Ademais, são verificados elevados níveis de vibrações no túnel que interferem no resultado e limitam a utilização da máquina, já que as faixas de velocidades de escoamento que gerarão resultados confiáveis diminuirão. A Figura 1 apresenta o túnel de vento AA-TVSH2, onde a região destacada pelo círculo azul representa a seção de ensaios.



Figura 1 – Túnel de vento AeroAlcool AA-TVSH2.

Diante do exposto, propõe-se investigar e alterar o comportamento dinâmico do túnel de vento por meio da mudança de sua rigidez e massa [3], visando minimizar os níveis de vibração na região de ensaios.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um movimento periódico é caracterizado como um movimento efetuado por um objeto que faz uma trajetória fechada durante um intervalo de tempo finito, reiniciando o movimento sempre que chega no ponto inicial [3]. O exemplo mais simples de movimento periódico é o Movimento Harmônico Simples (MHS), em que a trajetória é uma linha reta finita em que o objeto se movimenta de um lado para o outro da linha, em torno do ponto central, durante um intervalo de tempo finito, sendo a posição, velocidade e aceleração do objeto descritas pelas equações (1), (2) e (3):

$$x(t) = A * \text{sen}(\omega t + \emptyset) \quad (1)$$

$$v(t) = A\omega * \text{cos}(\omega t + \emptyset) \quad (2)$$

$$a(t) = -A\omega^2 * \text{sen}(\omega t + \emptyset) \quad (3)$$

Um dos sistemas de MHS mais estudados são os sistemas massa mola, que consiste em uma mola presa por uma das extremidades de uma mola, cuja outra extremidade encontra-se fixa, então o sistema é retirado do repouso por uma força externa, o resultante após se cessar a força externa é o objeto do estudo. Em outros casos são também colocados um amortecedor no sistema massa mola com o objetivo de analisar o efeito da presença do amortecedor no sistema, sendo chamado de sistema massa-mola-amortecedor [3].

2.1. Vibração

Movimento periódico é aquele que se repete ao longo do tempo. Assim, pode-se classificar o módulo de vibrações em função dos graus de liberdade do sistema, vibrações livres ou forçadas, amortecidas ou não amortecidas e determinística ou aleatória. A seguir tem-se a definição de cada um desses itens:

- Graus de Liberdade: O número mínimo de coordenadas independentes requeridas para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema a qualquer instante;
- Vibração livre: Se um sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria, a vibração resultante é conhecida como vibração livre;
- Vibração forçada: Se um sistema, após uma perturbação inicial, ainda sofre a ação de uma força externa, a vibração resultante é conhecida como vibração forçada;
- Vibração amortecida: Se houver energia dissipada durante a oscilação, a vibração é dita amortecida;
- Vibração não amortecida: Se nenhuma energia for dissipada durante a oscilação, a vibração é dita não amortecida;

- Vibração determinística: Se o valor ou magnitude da excitação que está agindo sobre um sistema vibratório for conhecido a qualquer instante dado, a excitação é denominada como vibração determinística;
- Vibração aleatória: Se não for o caso da vibração determinística.

2.2. Vibração de Estruturas

A maioria das estruturas, das mais diversas naturezas (estruturas imobiliárias, veículos, máquinas em geral), podem ser associadas a modelos de sistemas massa-mola-amortecedor conectados uns aos outros de forma que o comportamento da estrutura se próxima de um sistema massa-mola-amortecedor, permitindo estudar a estrutura a partir desta representação. Um conceito importante é o conceito de ressonância, que é caracterizado pelo fenômeno causado ao se excitar uma estrutura com frequência igual a sua frequência natural [3], como mostrado na Figura 2.

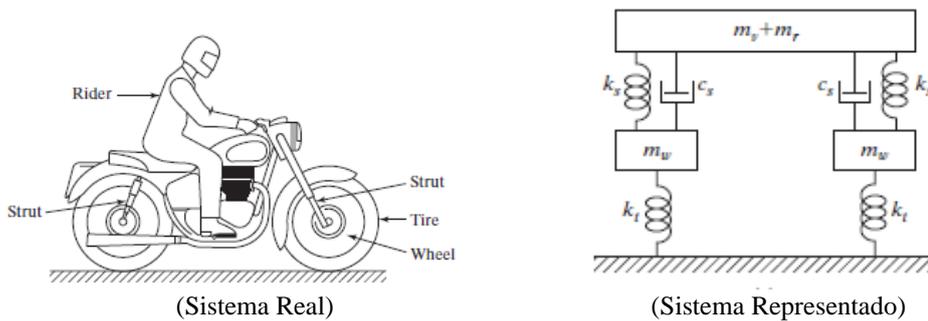


Figura 2 – Representação Sistema Real - Representação sistema massa mola equivalente. (Singiresu S. Rao. Sexta edição)

O sistema amortecido também entra em ressonância, com amplitudes de movimento amplificadas, no caso de baixo amortecimento.

3. METODOLOGIA

3.1. Modelagem

Para a investigação estrutural e a análise da solução que diminua a vibração do túnel de vento considerado neste trabalho, exposto na Figura 1, propõe-se utilizar a ferramenta de análise modal do programa computacional Inventor da Autodesk.

Para tanto, primeiramente deve-se modelar todas as peças que compõem o túnel de vento para depois juntá-las em uma montagem. Assim, foram obtidas medidas de cada parte, usando a trena para dimensões maiores e paquímetro para dimensões menores, na Figura 3 tem-se uma imagem com os equipamentos de medida.



Figura 3 – Trena (na parte superior da imagem) e Paquímetro (na parte inferior da imagem)

A empresa AeroAlcool não forneceu nenhuma informação com relação aos materiais que constituem o túnel de vento. Desta forma, considerou-se a parte metálica de aço carbono, os tampos de madeira de compensado MDF, os difusores de plástico reforçado com fibra de vidro e a seção de ensaios de acrílico.

A montagem das peças formando o túnel de vento está exposto na Figura 4, enquanto na Tabela 1 tem-se a descrição das principais partes com material e densidade.

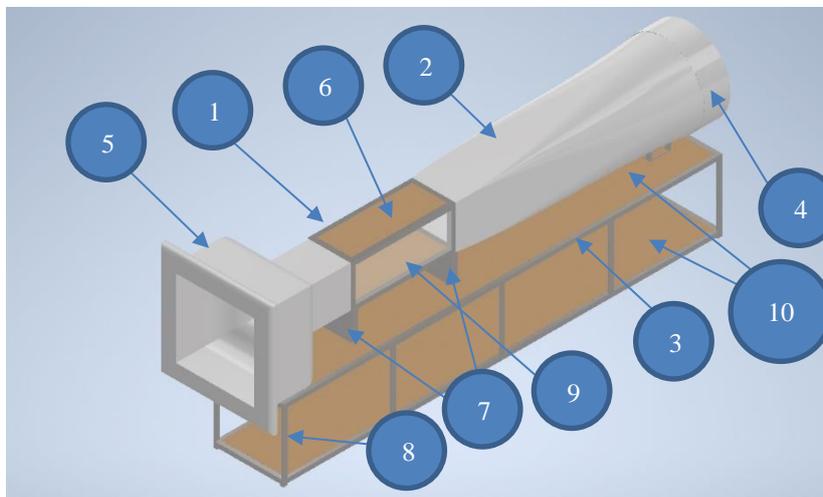


Figura 3 – Modelo do túnel de vento.

Tabela 1 – Lista das peças com nome, material e densidade.

Peça	Nome	Material	Densidade(kg/m ³)
1	Estrutura da seção de teste	Aço Carbono	7861,09
2	Difusor primário	PFRV	1743,834
3	Estrutura base do túnel de vento	Aço Carbono	7861,09
4	Compartimento do motor	PFRV	1743,834
5	Difusor secundário	PFRV	1743,834
6	Superfície horizontal da seção de teste	MDF (Madeira)	802,72
7	Estrutura do suporte 1	Aço Carbono	7861,09
8	Estrutura do suporte 2	Aço Carbono	7861,09
9	Superfície vertical da seção de teste	Acrílico	1190,24
10	Tampo da superfície da base	MDF (Madeira)	802,72

Em sequência, para fixar as peças foram usadas restrições do tipo rígida. A mesma restrição também foi aplicada nos pés da estrutura em contato com chão. A Figura 4 ilustra as restrições utilizadas no pé do modelo.

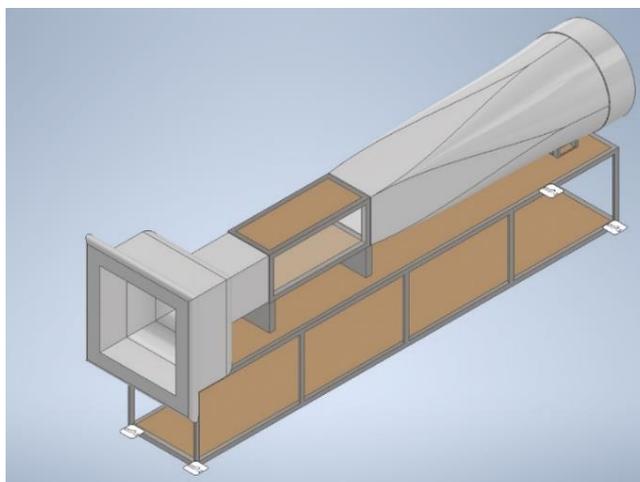


Figura 4 – Restrições da modelagem nos pontos de fixação da estrutura

Com o modelo é possível investigar soluções que minimizem a vibração na seção de testes. A ideia, portanto, é adicionar contraventamentos e outras soluções na estrutura base do túnel de vento e comparar as propostas.

3.2. Comparação

Porém, após a modelagem é necessário averiguar se o modelo corresponde aos níveis de vibração do túnel de vento real. Para tanto foram escolhidos 3 pontos aleatórios em cada uma das 4 laterais da seção de teste para serem mensurados os respectivos deslocamentos, isto tanto na modelo como no equipamento real.

Para a medição do deslocamento no Túnel de Vento foram utilizados 3 acelerômetros modelo PCB 352C03 piezoelétricos com sensibilidade de $1,03 \text{ mV/m/s}^2$. Sendo a deslocamento obtida através da integral da velocidade, que por sua vez é obtida através da integral do sinal de aceleração proveniente do acelerômetro. Os acelerômetros via cabo coaxial BNC são conectados à uma placa de aquisição de sinal da National Instruments NT9234 NI USB-9162, que conectada à um computador portátil adquire os dados. A Figura 5 apresenta os equipamentos utilizados.



Figura 5 – Caixa dos acelerômetros, cabo coaxial BNC e placa de aquisição de sinal.

Com o sistema de aquisição montado foram medidas as acelerações das vibrações do túnel de vento enquanto gerava escoamentos de 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 m/s, sendo mensurado as acelerações 3 vezes para cada velocidade. Este processo foi feito em todos os lados da seção de teste (Item 9 – Figura 3).

Os dados coletados pelo programa foram processados e calculado a Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density - PSD*), que permite quantificar a potência de vibração por faixa de frequência.

Finalmente o valor obtido por meio do experimento foi comparado ao valor obtido com o modelo simulacional para validar o modelo. Permitindo, assim, estudar a soluções que minimizam a vibração do túnel de vento na seção de teste.

4. RESULTADOS

4.1 Validação do modelo

Na Figura 6 tem-se as curvas de PSD em função das velocidades de escoamento. Cada curva representa a média dos 3 acelerômetros em cada lateral.

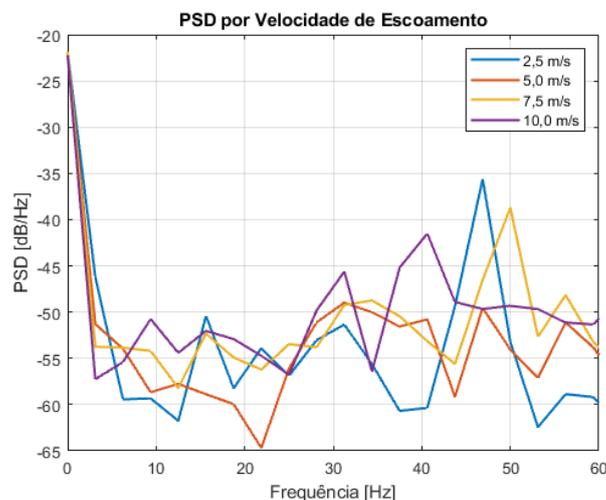


Figura 6 – PSD por velocidade de escoamento.

Observa-se na Figura 6 que o túnel de vento possui níveis elevados de vibração na banda de 30 a 50 Hz.

Em sequência, é apresentado na Figura 7 a densidade modal do modelo obtido pelo programa computacional Inventor da Autodesk. O modelo inicial é denominado “Original” para diferenciá-lo ao estudar as soluções futuras.

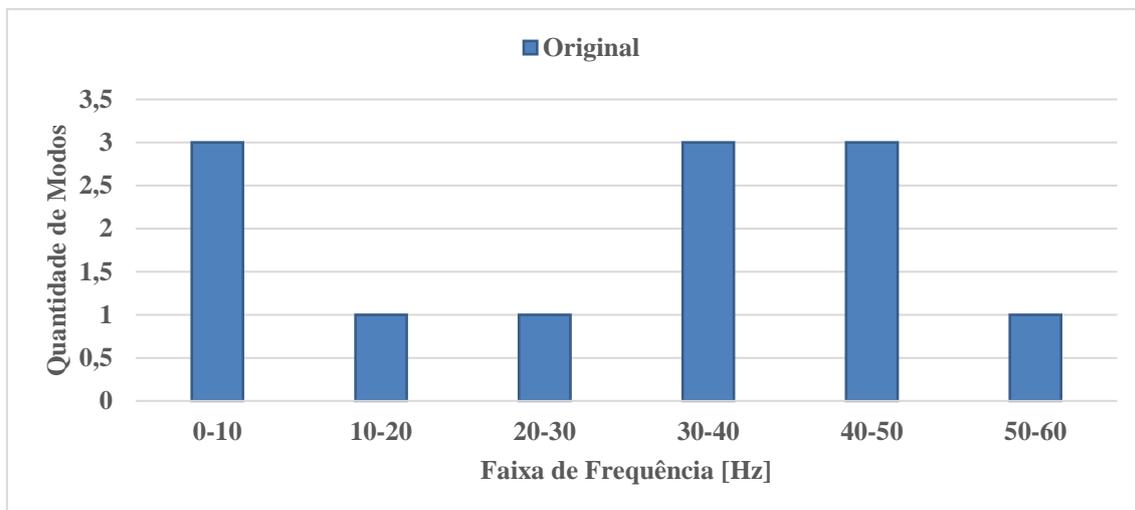


Figura 7 – Densidade modal do modelo do túnel de vento.

Verifica-se que o modelo possui maior quantidade modal na faixa de 30 a 50 Hz, conforme notado nas curvas de PSD do experimento, Figura 6. Além disso, nas baixas frequências, 0 a 10 Hz, também se observa elevada quantidade modal. No entanto, pelos dados experimentais, Figura 6, consta-se que essa região possui baixa energia de vibratória. Deste modo, considera-se que o modelo representa o túnel de vento em estudo, e parte-se para o estudo das soluções.

4.2 Estudo das soluções

Visando minimizar a densidade modal na faixa de 30 a 50 Hz, são propostas três soluções. A primeira solução sugere restringir o movimento da estrutura do suporte da seção de teste. A segunda solução propõe diminuir o movimento da estrutura a montante da seção de teste. A terceira solução visa reduzir o movimento da base que suporta o túnel de vento. As três soluções são apresentadas na Figura 8.

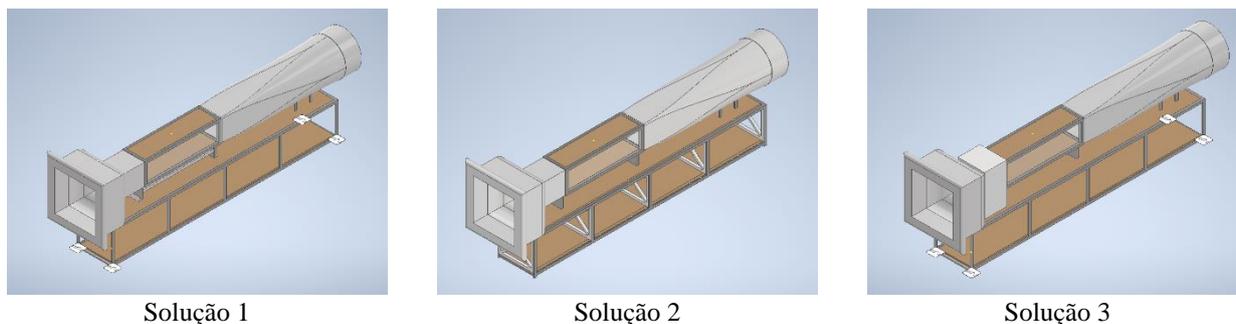


Figura 8 – Soluções propostas para minimizar a densidade modal do túnel de vento na faixa de 30 a 50 Hz.

Em sequência na Figura 9 são apresentadas a densidade modal das soluções com o modelo “Original”. Enquanto, na Tabela 2 são dispostos as frequências dos modos de vibrar até 60 Hz dos modelos.

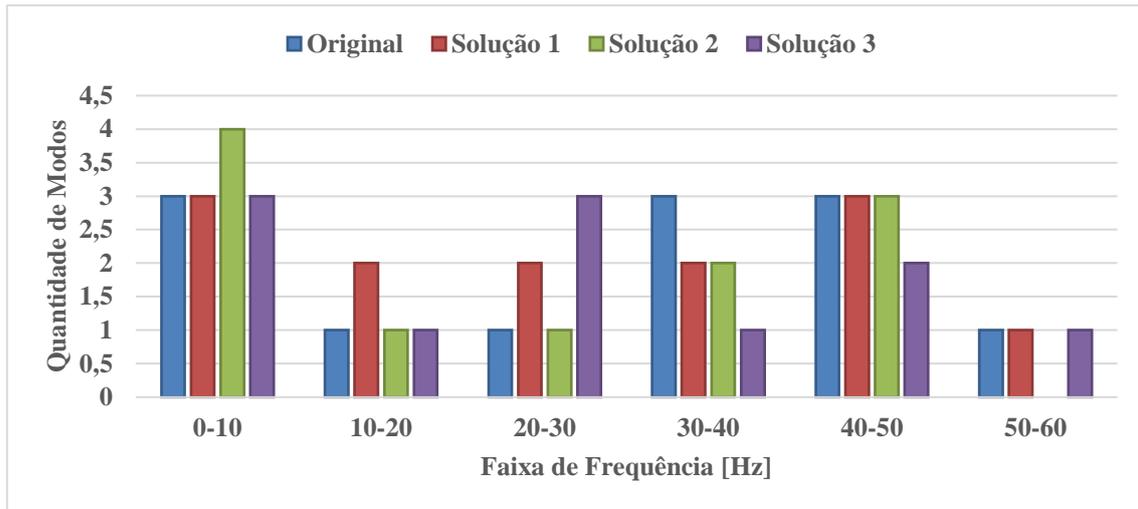


Figura 9 – Densidade modal do modelo do túnel de vento com as soluções.

Tabela 2 – Frequência dos modos de vibrar dos modelos até 60 Hz.

Modelo	Frequência modal [Hz]												
	Original	4,46	6,29	7,32	14,1	24,97	30,09	33,86	34,72	48,07	48,52	48,93	58,92
Solução 1	4,12	5,04	6,43	13,73	15,45	22,60	27,03	30,75	39,69	42,68	46,34	48,28	54,32
Solução 2	5,44	6,62	7,05	9,65	16,54	24,16	32,03	38,30	43,19	45,49	46,14		
Solução 3	4,49	5,63	7,30	13,41	24,31	29,15	29,98	34,53	48,26	48,48	50,29		

Nota-se que todas as soluções diminuíram a densidade modal na faixa de 30 a 40 Hz, enquanto apenas a solução 3 reduziu na faixa de 40 a 50 Hz. Portanto, a solução 3, que reduz o movimento da base que suporta o túnel de vento é a mais indicada para diminuir a densidade modal na faixa de 30 a 50 Hz.

5. Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Com o estudo da vibração estrutural do Túnel de Vento modelo AA-TVSH2, e sua compatibilidade com o modelo elaborado computacionalmente no Inventor, pôde-se elaborar 3 soluções para a reduzir a densidade modal e averiguar sua eficácia de cada solução na montagem feita no programa. Na faixa de frequência entre 30-40 Hz, as 3 soluções foram eficazes para diminuir as vibrações. Já entre 40-50 Hz a solução 3 foi a única que apresentou alguma redução na frequência. Assim a solução 3, dentre as que foram elaboradas, é a mais indicada para reduzir a densidade modal na faixa de 30 a 50 Hz.

Como trabalhos futuros, sugere-se investigar outras soluções. Ou ainda, combinar as soluções avaliadas neste trabalho a fim de investigar o impacto na redução da densidade modal.

6. Agradecimento

Agradecemos à FURNAS Centrais Elétricas pelo incentivo e apoio financeiro que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

7. Referências

- [1] AEROALCOOL, AA-TVSH2: Túnel de Vento Subsônico. Disponível em: <http://www.aeroalcool.com.br/index.php/tuneis-de-vento/25-gallery/tuneis-de-vento/118-aa-tvsh2>. Acesso em 30/05/2021
- [2] CARDOSO, F. M. R.; Caracterização Experimental de Túneis de Vento para a Análise de Potencial Eólico. Dissertação de Mestrado – UFG; Goiânia-GO, 2020.
- [3] RAO, S., Vibrações Mecânicas, 4 Edição, Pearson Education do Brasil, 2009.
- [4] INVENTOR, Education Community: Projeto o seu Futuro. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/education>. Acesso em 30/05/2021

[5] https://www.youtube.com/watch?v=LV_UuzEznHs

[6] Cardoso, F. M. R. Caracterização experimental de túneis de vento para a análise de potencial eólico. 2020. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.