

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO
DE AR EM TUNEL DE VENTO SOB EFEITO DE UM DISCO DE AÇO
AQUECIDO POR ELEMENTOS PELTIER NO PISO

Por

Roges de Mari Leopoldo

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do
diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

de Mari Leopoldo, ROGES
DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES DO
ESCOAMENTO DE AR EM TUNEL DE VENTO SOB EFEITO DE UM
DISCO DE AÇO AQUECIDO POR ELEMENTOS PELTIER NO PISO. /
ROGES de Mari Leopoldo. -- 2021.
24 f.
Orientador: Bardo Ernst Josef Bodmann.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Túnel de vento. 2. Efeitos térmicos. 3. Peltier.
4. Anemômetro de fio quente. 5. Termoresistor. I.
Ernst Josef Bodmann, Bardo, orient. II. Título.

Roges de Mari Leopoldo

DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO DE
AR EM TUNEL DE VENTO SOB EFEITO DE UM DISCO DE AÇO AQUECIDO
POR ELEMENTOS PELTIER NO PISO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COM PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^ª. Dra. Bardo Ernst Josef Bodmann

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^ª. Dr. Volnei Borges

Prof./Prof^ª. Dr. Sérgio Luiz Frey

Prof./Prof^ª. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2021.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos aos colegas do Laboratório de aerodinâmica das construções, aos professores Bardo Ernst Josef Bodmann e Acir Mercio Loredo Souza, meu amigo e sócio João Pedro Anzolch e minha mãe por todo carinho e dedicação.

LEOPOLDO, R. D.M. Desenvolvimento do Perfil de Velocidades do escoamento de Ar em Túnel de Vento Sob Efeito de um Disco de Aço Aquecido por Elementos Peltier. 2021.13f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo explorar os fenômenos envolvidos da interação entre o escoamento de ar e um gradiente térmico a montante da posição onde foram feitas as medições do experimento. Este tipo de interação faz parte das principais causas de turbulência em uma determinada massa de ar em movimento [Jervel, 2008], o que impacta na eficiência de aerogeradores, ações estáticas e dinâmicas do vento em estruturas entre outros. Para fazer esta análise do escoamento de ar, foi utilizado o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pré-configurando ele para se obter um escoamento de ar com baixa turbulência causada por obstáculos, deixando assim em destaque a turbulência causada pela componente térmica. Para causar este fluxo térmico na área do experimento, foi construído um dispositivo composto por uma placa de aço circular, com elementos Peltier acoplados nesta, que quando energizados, aqueciam a face voltada para o interior do túnel de vento. Para esta análise foi utilizado anemometria de fio quente, medindo a velocidade do escoamento e uma sonda de temperatura termoresistor PT100, ambos na mesma altura em relação ao piso do túnel de vento. Estes sensores foram posicionados e deslocados por um pórtico controlado remotamente para facilitar a operação dos ensaios. Devido a turbulência ser não linear, optou-se pelos quatro momentos estatísticos (média, variância, assimetria e curtose), obtidos para 16 posições verticais entre 5 mm e 300 mm acima da placa de aço e ao longo de quatro posições da direção do escoamento de ar. As mudanças nos momentos estatísticos devido à presença de efeitos térmicos ao longo do escoamento foram comparadas e indicaram a formação de um regime de escoamento quase permanente no final da placa de aço.

PALAVRAS-CHAVE: túnel de vento, efeitos térmicos, placas Peltier, anemômetro de fio quente, termoresistor.

LEOPOLDO, R. D. M. **Development of the Speed Profile of Air Flow in a Wind Tunnel under the Effect of a Steel Disc Heated by Peltier Elements on the Floor.** 2021. 13f. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The present work aimed to explore the phenomena involved in the interaction between the air flow and a thermal gradient upstream of the position where the measurements of the experiment were made. This type of interaction is part of the main causes of turbulence in a given moving air mass [Jervel, 2008], which impacts the efficiency of wind turbines, static and dynamic wind actions in structures, among others. To make this analysis of the air flow, the wind tunnel Prof. Joaquim Blessmann at the Federal University of Rio Grande do Sul, preconfiguring him to obtain an air flow with low turbulence caused by obstacles, thus highlighting the turbulence caused by the thermal component. To cause this thermal flow in the area of the experiment, a device was built consisting of a circular steel plate, with Peltier elements attached to it, which when energized, heated the face facing the interior of the wind tunnel. For this analysis, hot wire anemometry was used, measuring the flow speed and a PT100 thermoresistor temperature probe, both at the same height in relation to the wind tunnel floor. These sensors were positioned and moved by a remotely controlled gantry to facilitate the operation of the tests. Due to the non-linear turbulence, we opted for the four statistical moments (mean, variance, asymmetry and kurtosis), obtained for 16 vertical positions between 5 mm and 300 mm above the steel plate and along four positions of the flow direction. of air. The changes in the statistical moments due to the presence of thermal effects along the flow were compared and indicated the formation of a nearly permanent flow regime at the end of the steel plate.

KEYWORDS:wind tunnel, thermal effects, Peltier plates, hot-wire anemometer, thermalresistor.

NOMENCLATURA

Símbolos

X	Variável aleatória
n	Número de termos
S	Desvio padrão
S^2	Variância

Símbolos gregos

Σ	Somatório
----------	-----------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.3	OBJETIVO	2
2	FUNDAMENTAÇÃO	2
3	METODOLOGIA	3
3.1	INSTRUMENTAÇÃO	3
3.2	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	3
3.2.1	DISCO AQUECIDO.....	3
3.2.2	PÓRTICO PARA MOVIMENTAÇÃO EM 3 EIXOS.....	4
3.2.3	EXPERIMENTO	5
4	RESULTADOS	6
5	CONCLUSÃO	11
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
	APÊNDICE.....	13

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Um campo de pesquisa pouco estudado é o dos efeitos térmicos perturbando um escoamento de ar e os fenômenos que são modificados por esta interação, sob uma perspectiva ambiental. Dentre estes fenômenos podemos citar a turbulência, que é gerada por dois fatores: atrito do escoamento de ar com uma superfície e por efeitos térmicos, que podem criar o movimento vertical de massa de ar [Jervel, 2008]. Já existe vasto conteúdo relativo a perfis de velocidade do ar e geração mecânica da turbulência, forçada por obstáculos ou rugosidade da superfície. Porém, estudos correlacionando um fluxo térmico a montante do escoamento de ar em ambientes abertos e dentro da camada limite atmosférica são raros, necessitando uma exploração em laboratórios especializados.

Um projeto conduzido no Laboratório de aerodinâmica das construções, no ano de 2018, foi o projeto STROMA, que iniciou uma série de experimentações no LAC, onde basicamente cria-se uma fonte de calor no percurso do escoamento de ar dentro do túnel de vento, e, a partir disto, vai se modificando as características do vento para alguns padrões que simulam a CLA, obtendo assim dados importantes que podem ser usados para estudos de eficiência de aerogeradores, análise estática e dinâmica da ação do vento em estruturas, dispersão de poluentes na atmosfera, conforto de pedestres (Blocken; Carmeliet, 2004) entre outros. Por isso, a continuidade destes trabalhos é importante, sendo necessário na sequência do projeto STROMA, a validação do pleno desenvolvimento do perfil de velocidades, utilizando o mesmo túnel de vento e uma análise mais criteriosa deste desenvolvimento.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Loredo-Souza et al, 2004, detalhou o funcionamento de um túnel de vento, explicando como se simula a CLA, com diversos perfis de velocidade do ar na área de ensaio, relativos a alguns tipos de terrenos na natureza.

A camada limite atmosférica (CLA) é a região da troposfera diretamente afetada pela presença da superfície da Terra e responde a forçantes superficiais com escalas de tempo em torno de uma hora ou menos. Os forçantes incluem arrasto, evaporação e evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidas pela topografia. Sendo assim relevante estudar a fundo o entorno [Loredo-Souza et al, 2004, p1].

Jervel, 2008, descreveu como uma análise da turbulência é de difícil abordagem através de equações diferenciais determinísticas. Porém, devido a não linearidade e uma amostra de dados limitada, a melhor metodologia matemática é utilizar técnicas estatísticas.

Vieira, 2016, afirmou que, apesar de ser crucial a determinação da altura em que se instala o rotor de um aerogerador, onde quanto mais alto, maiores são as velocidades do vento, outros fatores influenciam o cálculo da energia em diferentes alturas, como densidade do ar, efeitos de esteira (aerodinâmicos) e intensidade de turbulência.

Degrazia, G.A. et al, 2018, aplicaram a ensaios em túnel de vento, um fluxo térmico positivo. Nestes ensaios, analisou-se o perfil de velocidade do vento a jusante de uma placa de alumínio com elementos Peltier aquecendo esta. O principal fenômeno estudado foi a turbulência, calculado pela variância da amostragem de dados.

Os trabalhos descritos acima, se relacionam na idéia central deste trabalho de conclusão de curso, pois explicam o funcionamento de um túnel de vento, o fenômeno da turbulência e como analisar os dados medidos em um trabalho relacionado. A publicação de Degrazia, G.A. et al, 2018, abordou estes temas também, porem ficou uma questão em aberto: O pleno desenvolvimento do perfil de velocidades, na jusante da placa aquecida, foi atingido?

1.3 OBJETIVO

Montar o disco de aço aquecido por elementos Peltier;
 Adaptar o p3rtico de movimentação atraves da adiç3o de um terceiro eixo;
 Realizar ensaios no t3nel de vento;
 Processar e analisar os dados obtidos.

2 FUNDAMENTAÇ3O

Para este trabalho, foram analisados os dados do experimento em t3nel de vento, com a instrumentaç3o de anem3metro de fio quente e sensor t3rmico, baseando os c3lculos da anemometria com uma abordagem estoc3stica dos valores adquiridos. Estes dados foram processados para calcular os 4 momentos estatísticos que s3o: m3dia, dispers3o, assimetria e curtose.

O c3lculo da m3dia da amostragem segue como na equaç3o 1, e com este valor inicia-se os demais c3lculos. Esta tend3ncia central, tamb3m 3 utilizada para a projeç3o de gr3ficos dos perfis, tanto de velocidade do escoamento quanto t3rmicos.

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i}{n} \quad (1)$$

A dispers3o representa na estatística, o qu3o longe os valores est3o da tend3ncia central. Para a formulaç3o dos resultados e conclus3es, utiliza-se a vari3ncia amostral, como na equaç3o 2, e o desvio padr3o amostral, como na equaç3o 3, para demonstrar a energia cin3tica turbulenta.

$$S^2 = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

A assimetria, como na equaç3o 4, quantifica o desvio de uma distribuiç3o em relaç3o a uma distribuiç3o sim3trica e o sinal resultante do seu c3lculo nos d3 o tipo de assimetria da distribuiç3o. Para valores positivos, os valores mais altos est3o do lado esquerdo do gr3fico, e do lado direito temos uma calda mais alongada. J3 para valores negativos, temos o contrario nesta distribuiç3o. Quanto mais pr3ximo de zero na assimetria, mais esta distribuiç3o sim3trica tem associada a si uma curva de frequ3ncias unimodal apresentando duas "caudas" sim3tricas em relaç3o a uma linha vertical que passa por seu ponto mais alto (eixo de simetria).

$$\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^3}{n \cdot S^3} \quad (4)$$

A curtose determina o grau de "achatamento" de uma distribuiç3o de frequ3ncias unimodal, quando esta distribuiç3o 3 comparada com uma distribuiç3o normal (Gaussiana). Ela 3 calculada conforme a equaç3o 5, abaixo.

$$\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^4}{n \cdot S^4} \quad (5)$$

Na distribuição unimodal, quanto maior for a concentração de valores em torno do centro, maior é o valor da sua curtose. Em um gráfico, a representação é uma curva mais afunilada na média. Seu coeficiente de momento de curtose é a razão entre o momento central de quarta ordem e o quadrado da variância. Quando esse valor é próximo de 3, a distribuição se aproxima da normal e chamamos de mesocúrtica. Valores maiores significam uma curva mais afunilada e é chamada de leptocúrtica, e valores menores de 3 significam uma curva mais achatada, chamada de platicúrtica.

Com a utilização destes 4 momentos estatísticos nos dados da anemometria de fio quente, possibilitou-se visualizar a energia mecânica do escoamento de ar, comparando-se o perfil de velocidades médias do escoamento de ar em um ensaio padrão do túnel de vento, com 4 perfis idênticos, porém com a chapa de aço, a montante, estando aquecida. Esta influência da fonte de calor, é percebida também pelo sensor de temperatura, e no gráfico do perfil de temperaturas, é possível notar a forma assintótica desta influência, comparando esta ocorrência com a distância correspondente na média de velocidades.

3 METODOLOGIA

3.1 INSTRUMENTAÇÃO

Os sensores utilizados tiveram diferentes funções, contando com um anemômetro de fio quente e um sensor térmico de resistência. Ambos estavam afixados dentro do túnel de vento, de forma que estivesse sempre a mesma altura em relação ao piso do túnel, porém não muito próximos lateralmente, pois o escoamento contornando o corpo dos sensores acaba influenciando tanto na velocidade, turbulência e temperatura, prejudicando assim a coleta de dados.

O anemômetro de fio quente é da marca Dantec Dynamics com a aquisição de dados feita pelo equipamento StreamLine Pro CTA system, que também conta com uma sonda de temperatura para a correção de velocidades medidas pelo fio quente.

Para a aquisição de dados da temperatura do escoamento, foi utilizado um sensor resistivo tipo k modelo PT100, este foi amplificado por um módulo modelo MAX31865 e ligado a uma plataforma de prototipagem eletrônica “open-source” Arduino Uno, e os valores de temperatura anotados automaticamente em uma planilha eletrônica pelo programa PLX-DAQ.

- A sensibilidade e alcance do fio quente foram de 0,001 m/s e de 0,02 até 10 m/s;
- A sensibilidade e alcance do sensor resistivo foram de 0,1°C e -50 até 100°C.

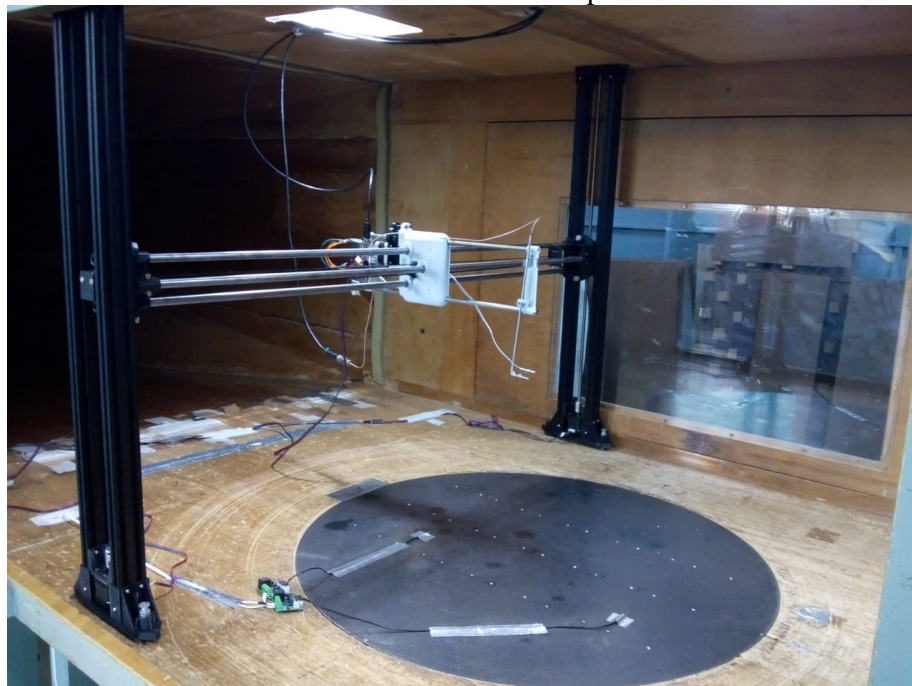
Foram utilizados dois termostatos modelo w1209, que exibiam em dois pontos diferentes do disco de aço a temperatura em °C.

3.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

3.2.1 DISCO AQUECIDO

Para o experimento, foi utilizado um disco de aço, observado na parte de baixo da Figura 1, com espessura de 2 mm, que ficava inscrito no piso do túnel de vento, não ficando desníveis entre o piso de madeira e a superfície do disco, e nem outras imperfeições como buracos ou reentrâncias no local instrumentado, o que poderiam influenciar o escoamento, sobrando assim apenas a interferência da temperatura da placa.

Figura 1 – Disco de aço no piso do túnel de vento. Acima tem a instrumentação, anemômetro e sonda de temperatura.



Neste disco da Figura 1, foi instalado elementos Peltiers, modelo TEC1-12710 de 100W, na parte de baixo da superfície, ficando assim externamente ao túnel de vento. Estes elementos são constituídos de semicondutores do tipo “n” e “p” e quando submetidos a uma diferença de potencial, direcionam os elétrons e o calor pelos pares ordenados, retirando calor de uma superfície quente e dissipando na outra pelo efeito Peltier.

Durante a operação do disco aquecido, o lado mais quente era da placa de aço, e no outro lado do elemento Peltier foi fixo dissipadores de alumínio de 25 mm de espessura, para o lado frio não acabar congelando, diminuindo assim a eficiência térmica do elemento.

Para a alimentação destes elementos Peltier, utilizou-se 8 fontes, Icel PS3010, que foram ajustadas para ser controlado a corrente fornecida para os elementos, facilitando o ajuste da temperatura em que estes chegavam.

Foram sobrepostos dois elementos Peltier que ficavam entre o disco de aço e o dissipador, e entre essas superfícies e entre os Peltier, foi colocada pasta térmica, marca Implastec de silicone modificado, para uma melhor condução térmica. Parafusos M4 foram fixos no conjunto de forma ao disco e o dissipador fazer um “sanduíche” com os dois elementos Peltier, ficando os fios elétricos destes, saindo através do dissipador.

O arranjo elétrico foi de 6 conjuntos de 6 elementos Peltier em paralelo e 2 conjuntos de 8 elementos em paralelo, totalizando 52 elementos.

3.2.2 PÓRTICO PARA MOVIMENTAÇÃO EM 3 EIXOS

Já utilizado em outros experimentos no laboratório de aerodinâmica das construções da UFRGS, este pórtico consiste em um carro, que conduz o suporte do anemômetro e do sensor de temperatura e seu movimento é acionado por motores de passo, modelo NEMA 17. No

eixo vertical, seu movimento tem um fuso de aço que quando gira acionado pelo motor de passo, move, através da castanha, o carro para cima e para baixo. No eixo horizontal, ortogonal ao escoamento dentro do túnel, o movimento é acionado por uma polia, conduzido também por um motor de passo.

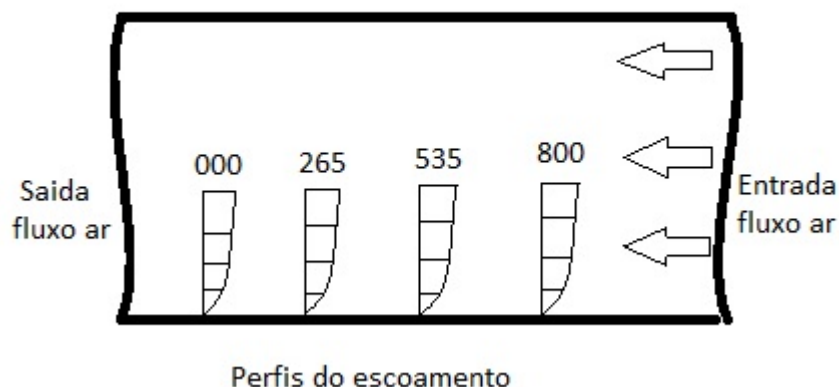
Para o presente trabalho, foi adicionado um terceiro eixo a movimentação do carro, este movimento é longitudinal em relação ao túnel, e fica paralelo ao escoamento. Para conseguir adicionar este movimento, o carro anterior foi modificado para comportar dois rolamentos lineares, modelo LM8UU e duas castanhas. Estes dispositivos dão o movimento linear para um guia cilíndrico e um fuso de aço, estes estão distante um do outro e unidos por uma peça de plástico nas duas pontas, a fim que os dois não girem relativamente, apenas se deslocem linearmente. O movimento é dado pela castanha fixa a uma engrenagem é rotacionada pelo motor de passo, e como ambos, motor e engrenagem estão limitados pelo carro, o movimento é transferido para o fuso axialmente.

Este pórtico é de suma importância para a celeridade da aquisição de dados, visto que sem ele, o posicionamento das sondas é feito de forma manual, tendo que parar o escoamento de ar e acessar o interior do túnel, o que acarreta em paradas de alguns minutos para cada ponto, enquanto que se esta troca for feita remotamente, apenas é necessário um período de 1 minuto para assegurar que a velocidade de escoamento de ar seja permanente, iniciando assim a próxima aquisição de dados.

3.2.3 EXPERIMENTO

O experimento consiste em comparar a influência de uma área aquecida no piso do túnel de vento, quando o escoamento de ar passa por esta. Para tal análise, mediu-se a velocidade do fluxo de ar em diversas distâncias do piso, estabelecendo assim um perfil de velocidades similar ao escoamento de Couette, em que, devido ao atrito, a velocidade do fluido é zero no piso e aumenta gradativamente com a distância. Estas medições foram feitas em alguns pontos longitudinais no túnel, como no ponto antes do escoamento de ar passar pelo disco aquecido, dois pontos equidistantes acima do disco aquecido e logo depois que o escoamento de ar passa pelo disco aquecido, observados na Figura 2, podendo assim verificar a modificação, que uma região aquecida, causa no perfil de velocidades. Outras análises, que derivam da análise de velocidades medias, foram feitas com o processamento de dados da anemometria, e serviram para qualificar o pleno desenvolvimento do perfil de velocidades de ar.

Figura 2 - Posições de medição de perfis, sobre o disco de aço. Corte lateral do túnel de vento.



O fio quente da marca Dantec Dynamics, foi ajustado para uma taxa de aquisição de 1024 dados por segundo e a amostra foi de 3 minutos. O objetivo de ter uma amostra grande é possibilitar tempo e dados suficientes, para estatisticamente, ser mais fidedigno com uma amostragem ideal, onde ocorrências de irregularidades momentâneas do método experimental, não influenciem os valores dos momentos estatísticos.

O túnel de vento foi configurado para ser o mais liso possível na parte interna, ficando assim praticamente um duto com comprimento de mais de 7 metros, o que garante que o perfil esteja plenamente desenvolvido na área dos testes. A velocidade de ensaio foi escolhida com base nos experimentos do projeto STROMA, em que se utilizou a frequência de giro da hélice do túnel de vento em 1 Hz, gerando uma velocidade média de 1 m/s no centro da seção transversal do túnel de vento. Ficando assim determinado uma velocidade de escoamento baixa, para que os efeitos convectivos interajam por mais tempo com o escoamento de ar, e sejam melhores visualizados, tanto no perfil de velocidades quanto de temperatura.

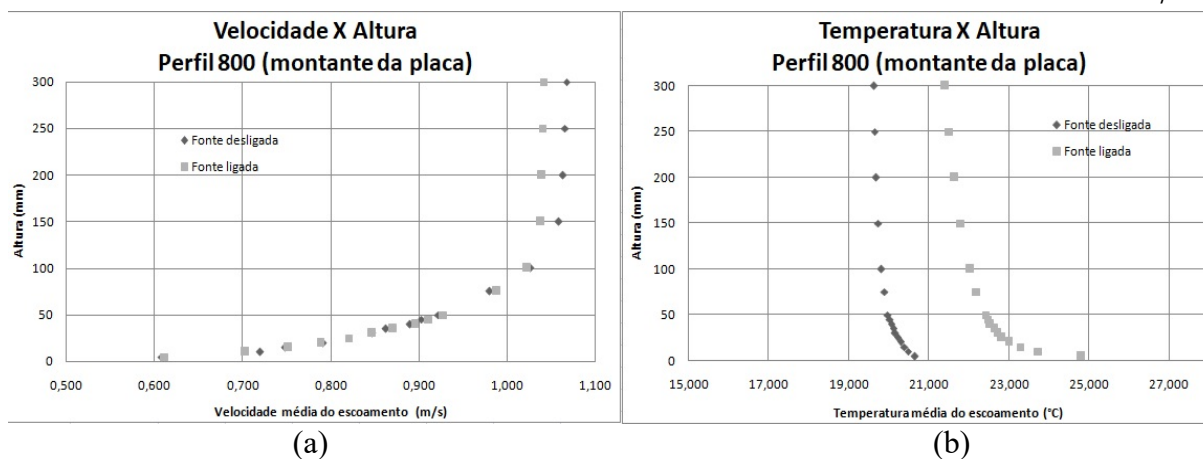
Os perfis foram discretizados com distâncias na vertical, a partir do disco aquecido. Estas distâncias se concentraram mais próximas do piso, onde é mais acentuada a variação de velocidade, e mais espaçadas a partir de 50 mm do piso, ficando assim os seguintes pontos: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, todos em milímetros.

4 RESULTADOS

O foco principal dos resultados foi a apresentação dos dados processados de velocidade e turbulência. Sendo a turbulência comparada com os momentos estatísticos, como assimetria e curtose, buscando graficamente demonstrar como estes tem diferenças ou semelhanças para uma determinada altura e comparando elas entre os 4 perfis tanto para a fonte de calor ligada quanto desligada.

O primeiro perfil analisado é sobre o ponto a montante do disco de aço, visualizado na Figura 3. Neste ponto, temos apenas o escoamento desenvolvido pelo piso de madeira do túnel de vento. Este perfil de velocidades não está sofrendo a influência da massa de ar aquecido da chapa e, por isso, é esperado que seja parecido com o mesmo perfil em que a chapa esteja na temperatura ambiente do lado interno no túnel.

Figura 3 – Perfil de velocidade e temperatura pela altura do piso. Perfil 800 a montante do disco aquecido.



Analisando a Figura 3(a), é possível notar que as velocidades têm pequenas diferenças, porém as curvas se sobrepõem. As diferenças que acontecem em alturas a partir de 100 mm são devidas a pequenos fatores experimentais, como variação de temperatura e pressão atmosférica entre um experimento e outro, visto que foram realizados com intervalos de várias horas entre eles.

Na Figura 3(b), a curva que representa a fonte de calor ligada, tem temperaturas maiores junto ao piso, isto se deve a, mesmo distante da fonte de calor, os processos convectivos e radiantes, influenciam a sonda de temperatura, porém é possível notar a forma parecida das curvas a partir de 75 mm, quando a influência se torna menor. A diferença de temperatura entre elas, também se deve ao intervalo de tempo que levou entre um ensaio e o outro, no qual já havia mudado a temperatura ambiente. Ajustes nestas temperaturas são possíveis, porém não é indicado, pois acarretaria imprecisão, pois não é possível identificar o ponto em que a influência térmica da chapa não é mais significativa, ficando assim a análise da temperatura mais qualitativa sobre as curvas e análise da inclinação dela nos pontos das alturas sobre o piso.

Os dois perfis sobre o disco, nos pontos 535 e 265 mm, figuras 4 e 5, recebem o calor do disco diretamente, e são onde a convecção e radiação devem ter seus efeitos mais pronunciados, porém, o efeito é mais pronunciado no perfil 000 pois sofre o efeito de aquecimento ao longo da chapa inteira, e entre o perfil 265 e 000 não há tanta diferença. Sobre estes dois pontos, o objetivo é observar a formação da camada limite, quando esta vai gradativamente mudando seu regime, sob a influência de um empuxo convectivo oriundo da chapa aquecida.

Figura 4 – Perfil de velocidade e temperatura pela altura do piso. Perfil sobre o disco aquecido, posição 535.

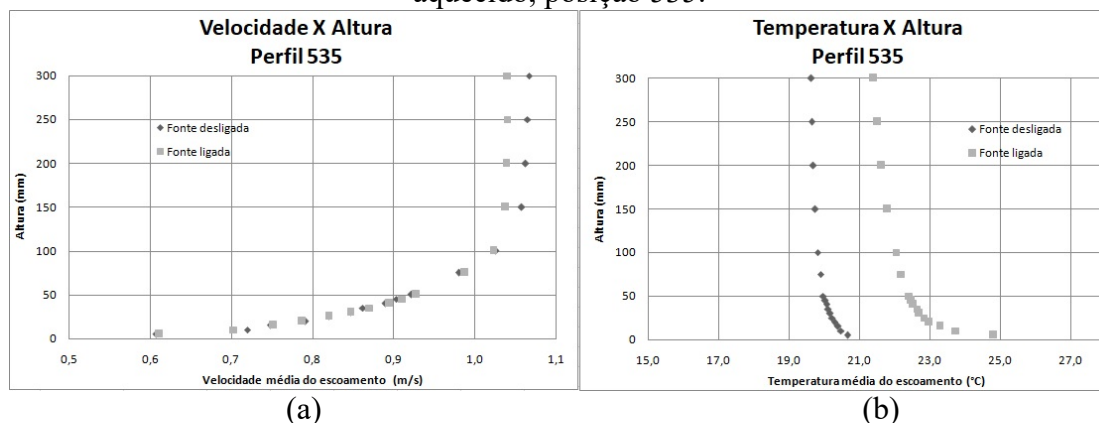
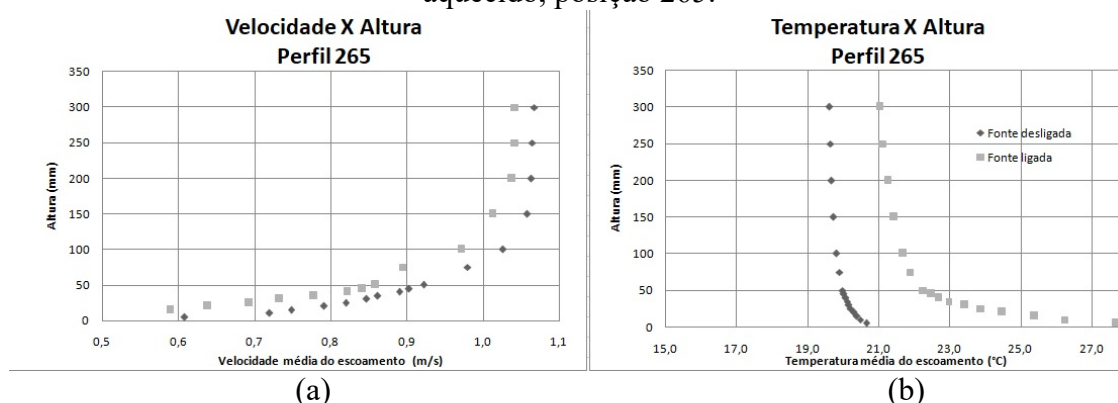


Figura 5 – Perfil de velocidade e temperatura pela altura do piso. Perfil sobre o disco aquecido, posição 265.

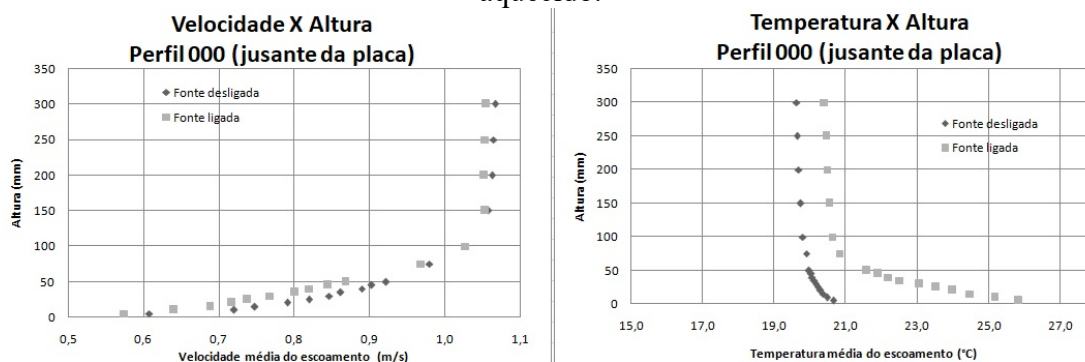


Nas Figuras 4(a) e 5(a), pode-se observar que o perfil em 535 mm é similar ao perfil 800mm da Figura 3, e que as curvas coincidem com o mesmo perfil com a fonte desligada, porém no perfil 265 mm estas linhas não coincidem, e as velocidades para cada altura foram menores na média do que a fonte desligada, isto pode ser explicado por uma turbulência maior junto ao piso quando a convecção é mais forte, dissipando a energia cinética na direção axial ao túnel de vento.

Nas Figuras 4(b) e 5(b), pode-se ver que as temperaturas junto ao piso são maiores, conforme o escoamento de ar permanece mais tempo se misturando com a massa de ar junto a chapa aquecida. O gráfico da temperatura do perfil 535 é similar ao do perfil 800 da figura 3, porém, o perfil 265 apresentou temperaturas elevadas próximo ao piso, modificando claramente a curva do gráfico, principalmente nos pontos até 50 mm de altura. Para ambos os perfis das Figuras 4 e 5, a influência térmica é notada até 50 mm de altura, e para alturas maiores, o predomínio da energia mecânica no escoamento de ar é evidente.

O último perfil do escoamento de ar, o perfil 000, pode ser observado na Figura 6. Nesse caso, o escoamento de ar percorreu toda a extensão do diâmetro de 800 mm do disco de aço, se misturando com o gradiente de temperatura, estabelecendo um possível balanço estacionário entre as forças viscosas, cinéticas e de empuxo da massa de ar que se encontram neste ponto.

Figura 6 – Perfil de velocidade e temperatura pela altura do piso. Perfil a jusante do disco aquecido.



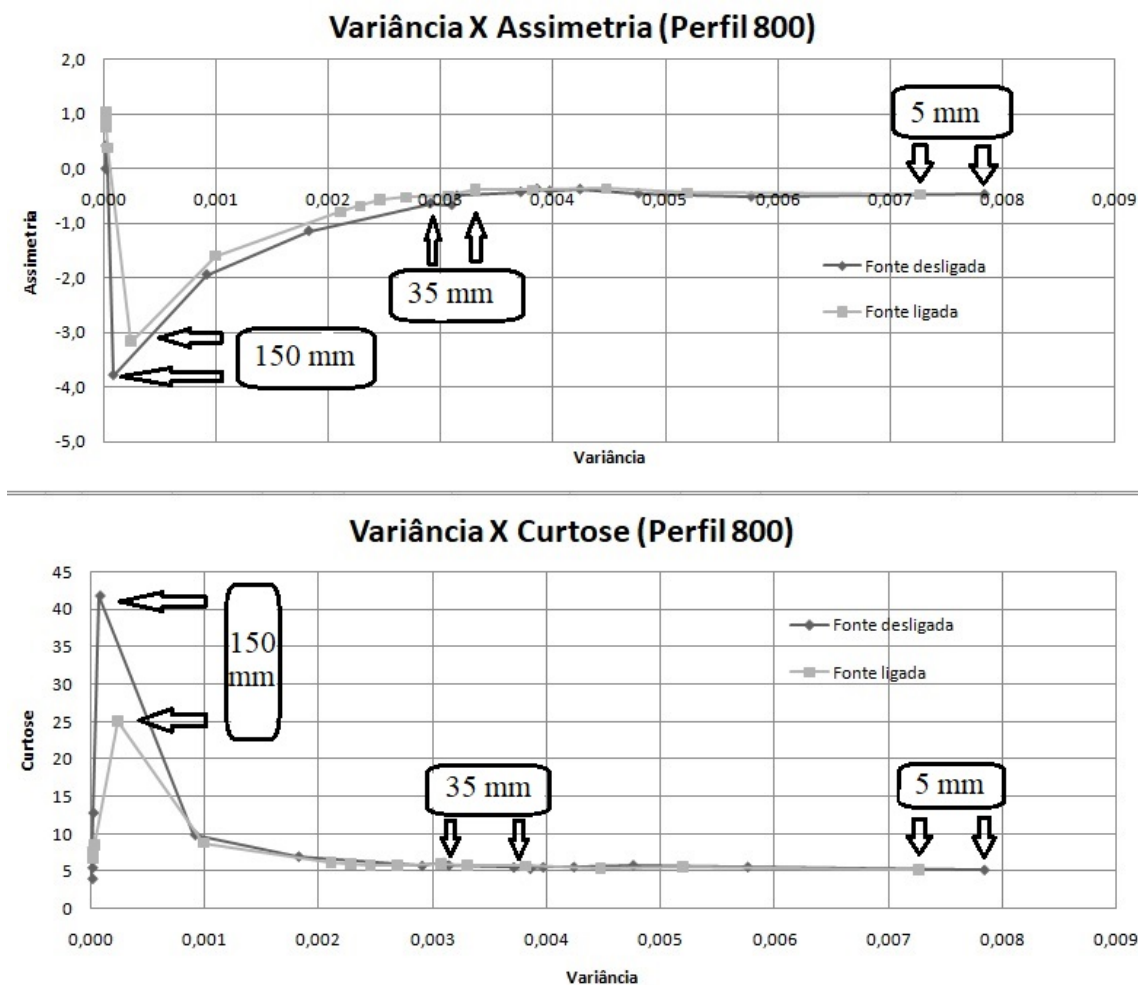
Nestes gráficos do perfil 000, Figura 6, pode-se observar como é a continuidade da exposição do escoamento a placa aquecida. As velocidades na mesma altura, para a fonte ligada e desligada, fizeram com que estas diminuíssem por causa das correntes convectivas serem mais intensas, aumentando a turbulência e transformando parte da velocidade em uma

componente vertical ao escoamento que não se soma ao valor de velocidade medido pelo anemômetro de forma linear. Isto é equivalente com o resultado apresentado pelo perfil 265, porém, quando comparamos os perfis mais influenciados pelo disco aquecido, no perfil 265, as velocidades ficaram mais baixas do que em 000 para as mesmas alturas, isto pode ser explicado por efeitos de borda no disco de aço, pois, apesar deste estar a aproximadamente 61°C a madeira do piso está a temperatura ambiente, o que causa imprecisão nos dados para baixas alturas e que prevalecem o gradiente convectivo. Mesmo com o escoamento vindo inteiramente da região da chapa aquecida, quando essa massa de ar mais quente encontra a madeira mais fria, ocasiona correntes descendentes, o que torna difícil uma afirmação nesta região limítrofe.

Para a segunda etapa dos resultados, utilizou-se os valores do segundo, terceiro e quarto momentos estatísticos para a análise. A variância corresponde à energia cinética turbulenta e foi usada como o numerador para o terceiro e quarto momentos estatísticos, em que será primeiro analisado a assimetria, comparando o quão próximo a distribuição de dados se aproximam de uma gaussiana. Já a curtose, quanto maior o valor, mais concentrado na média os dados estão.

Para o perfil 800, foram feitos gráficos com variância pela assimetria e variância pela curtose, observados na Figura 7, onde é possível fazer afirmações a respeito do desenvolvimento da camada limite nesta região.

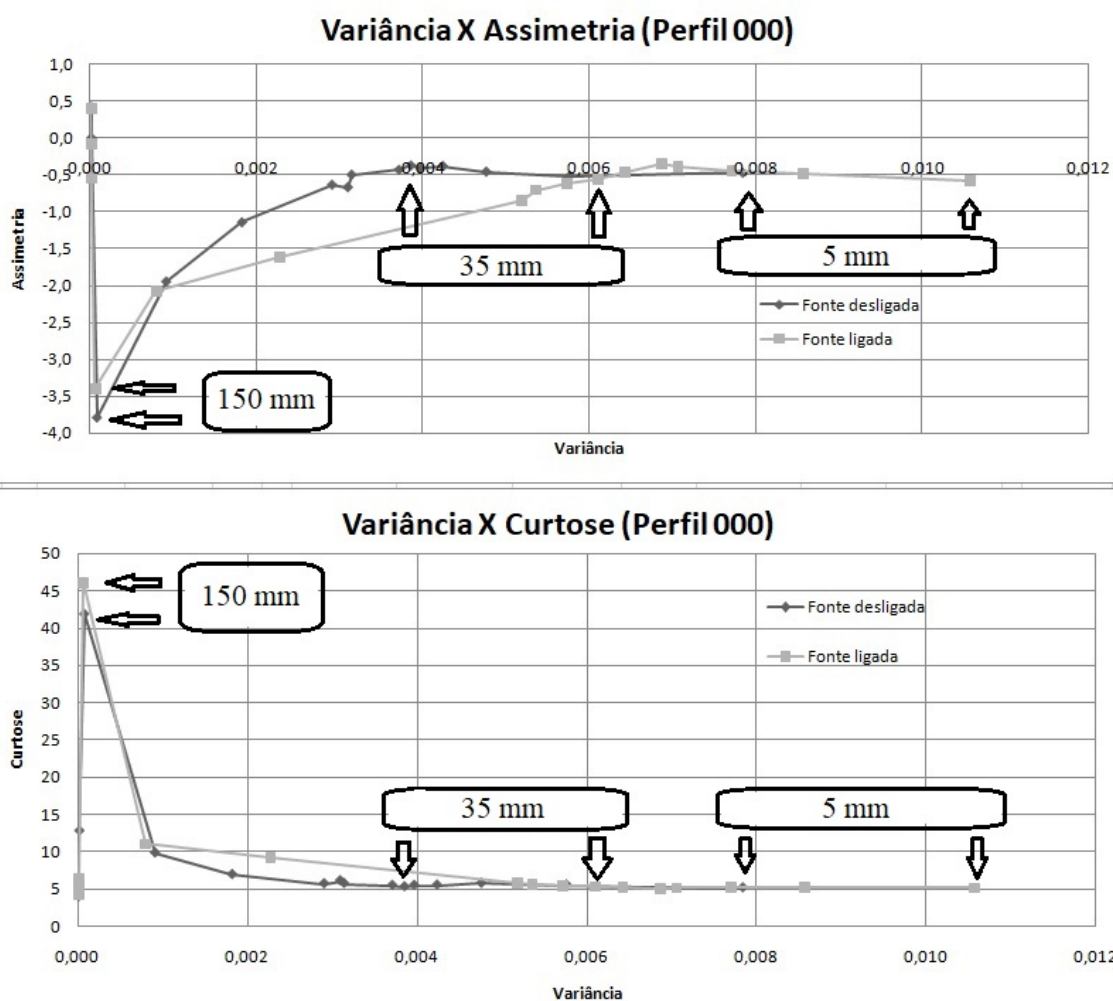
Figura 7 – Gráfico da variância pela assimetria e variância pela curtose. As alturas estão indicadas pelas setas em cada caso.



Na Figura 7, tem-se os gráficos do perfil, na extremidade do disco aquecido. Em 800, os pontos relativos à altura do perfil estão mais próximos em relação a variância por assimetria e variância pela curtose, o que indica que dentro dos valores medidos, a turbulência está próxima. A região do perfil 800 está no ponto montante da placa aquecida, o que diminui drasticamente a influência do calor o igualando com o caso da chapa sem gradiente de temperatura.

Em contrapartida, na Figura 8 temos os gráficos da variância pela assimetria e variância pela curtose, a jusante da placa aquecida, possibilitando visualizar o que o gradiente térmico sobre o disco de aço aquecido causou no escoamento de ar. O perfil 000 é na mesma posição em que foram realizados os experimentos no projeto STROMA, e ele será usado para identificar se o perfil de escoamento de ar está plenamente desenvolvido.

Figura 8 – Gráfico da variância pela assimetria e variância pela curtose. As alturas estão indicadas pelas setas em cada caso.



A Figura 8, foi ilustrada com indicativos referentes a algumas alturas importantes, afim de comparar estes pontos com os mesmos na Figura 7. A variância no perfil 000 aumentou significativamente nos pontos mais próximos do piso, onde a temperatura mais alta força um escoamento ascendente e conseqüentemente, maior turbulência. Nestes gráficos é possível observar nas alturas em destaque, que a assimetria e curtose ficaram próximas. Nos anexos deste trabalho de conclusão, tem os mesmos gráficos para os perfis 535 e 265, onde é possível observar a diferença de assimetria e curtose nas mesmas alturas, indicando intermitências nessas regiões sobre o disco.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso, tentou-se responder a questão que ficou em aberto no projeto STROMA, relativo ao pleno desenvolvimento da camada limite dentro do túnel de vento com um gradiente térmico no percurso do escoamento de ar, obtendo através dos dados e gráficos que este pode ser, sob certas reservas, plenamente desenvolvido a jusante do disco de aço aquecido, informação esta que pode se somar ao trabalho de Degrazia, G.A. et al, 2018, visto que os experimentos deles também ocorreu na borda a jusante do disco aquecido e as condições do túnel de vento, como configuração e velocidade de giro da hélice, foram similares.

O pleno desenvolvimento do perfil de velocidades é importante neste tipo de experimento, pois fica possível formular o escoamento, eliminando transientes e, portanto, diversas componentes que variam com o tempo de forma irregular.

Quando se pesquisa trabalhos parecidos com o Degrazia, G.A. et al, 2018, e este trabalho de conclusão, simplesmente não se encontram materiais e publicações, necessitando assim, que mais pesquisa parecida seja feita, pois, apesar de ser complexo o aparato para gerar o fluxo de calor dentro do túnel de vento, a relevância dos fenômenos envolvidos não deve ser desprezada em alguns estudos de simulação em túnel de vento, principalmente aqueles ensaios relativos a ambiental, como dispersão de poluentes ou energia, como por exemplo na eficiência de aerogeradores.

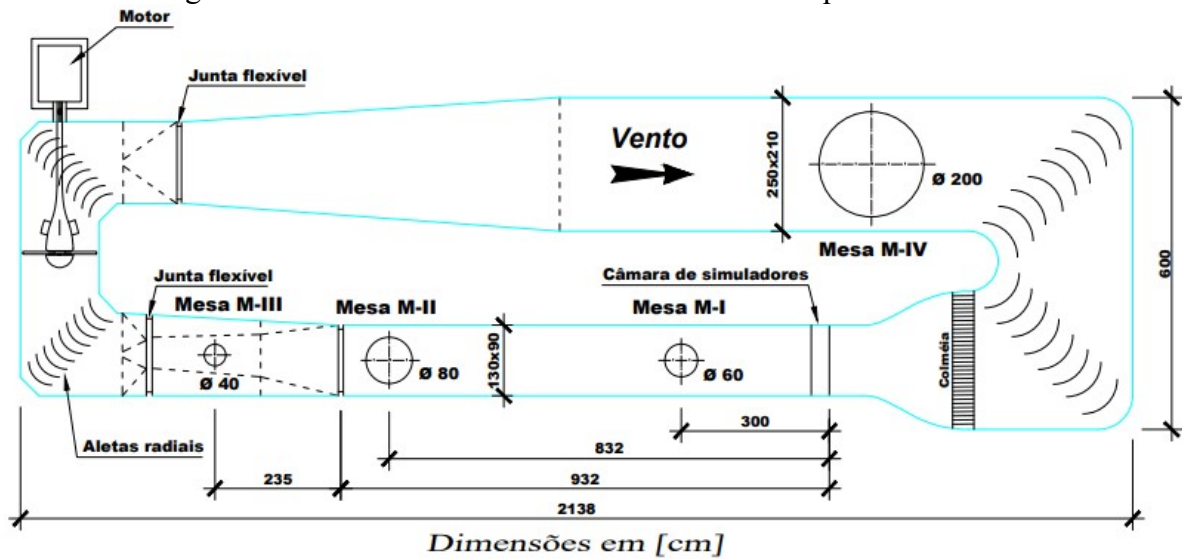
Para a análise da variação de temperatura com a distância da chapa, a temperatura muda apenas o estado do fluido, porém o fluxo de calor faz variar a entropia, perturbando o sistema, o que torna o trabalho relevante para campos com aerogeradores, onde a entropia acaba por dissipar a energia mecânica do escoamento de ar na altura em que se encontra as pás de um aerogerador. Em um ambiente real, o sol aquece o solo, e este força um gradiente convectivo a montante do aerogerador. Neste caso, remete ao exemplo de campos de aerogeradores no litoral do nordeste brasileiro terem, comparativamente, com campos no sul do país, menor eficiência, devido a estes trabalharem contra uma entropia maior do ambiente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Degrazia, G.A. *et al.* **Wind tunnel experiments with neutral and convective layer stabilities**. American Journal of Environmental Engineering, Rosemead, v. 8, n. 4, p.154-158, 2018. Disponível em:<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/187722/001083143.pdf?sequence=1>.
- Jervel, J. T. **Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores**, 2008.
- Loredou-Souza, A. M. ,Schettini. E. B, Paluch, M.J.**Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento**. ABCM,IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência 2004. Disponível em:<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/eptt/2004/portuguese/docs/cap5-cd.pdf>
- Vieira, M. R. P. **Impacto da altura de aerogeradores sobre a velocidade do vento, energia, efeito de esteira e intensidade de turbulencia: estudos de caso em três projetos eólicos localizados no Brasil**, 2016
- BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. **Pedestrian wind environment around buildings: literature review and practical examples**. Journal of Thermal Envelope and Building Science, v. 28, n. 2, p. 107-159, 2004.
- Dantec Dynamics A/S. **StreamWare Pro Installation and User Guide**. Skovlunde: Dantec Dynamics A/S, 2014.

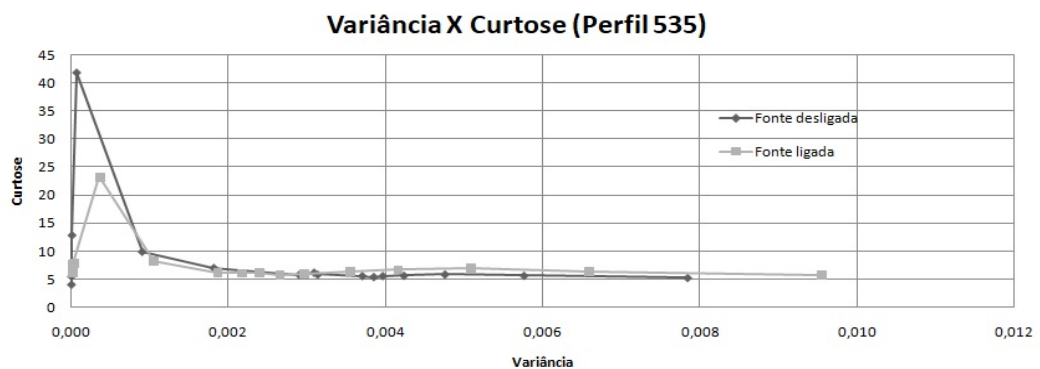
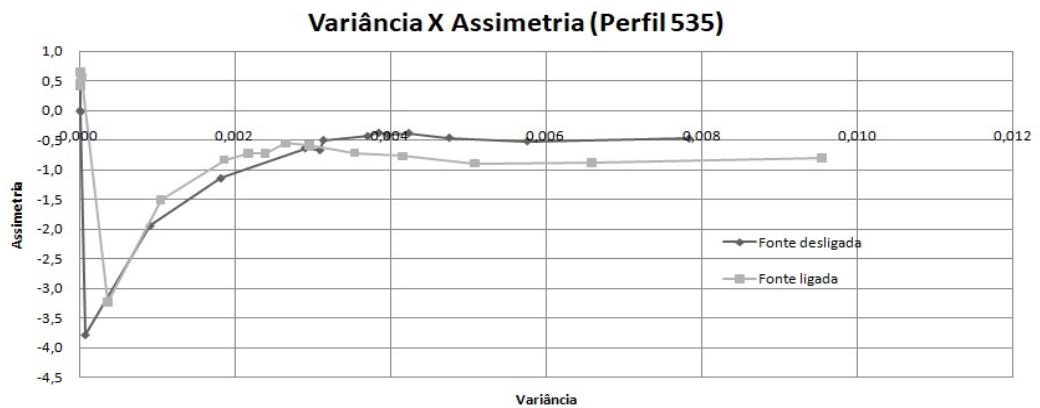
APÊNDICE

Figura A – Planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.



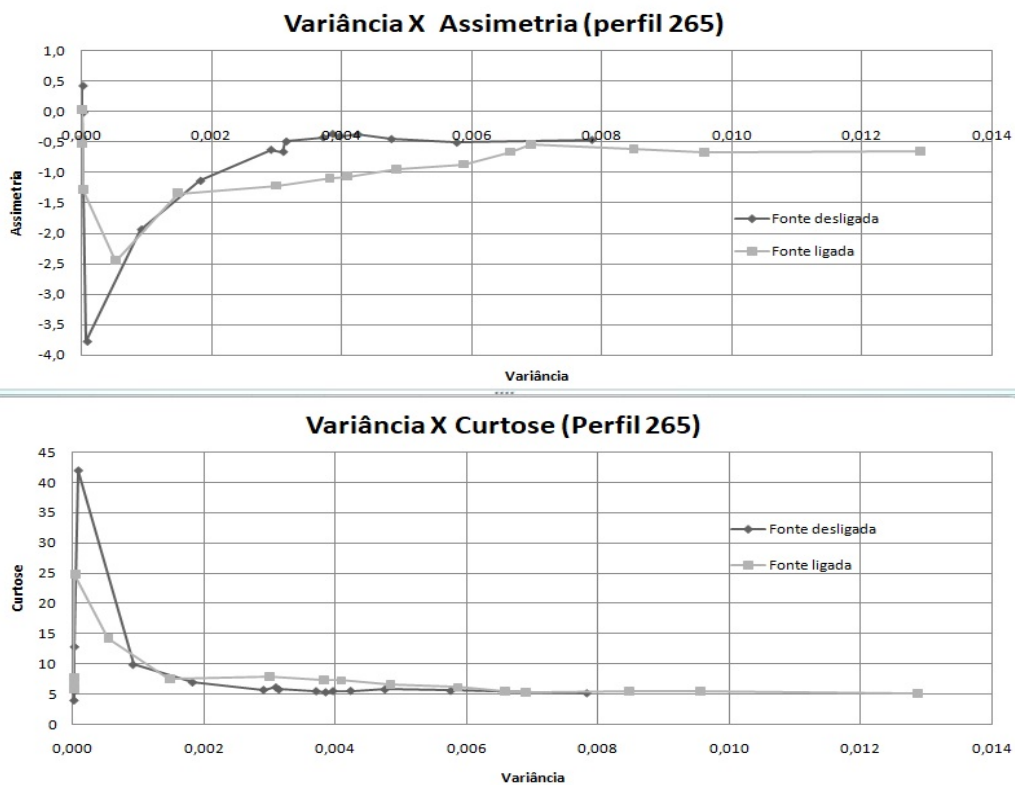
A Figura mostra a planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann onde foram executados os ensaios para este trabalho. O experimento ocorreu na Mesa II, conforme aparece na Figura 8 acima. Trata-se de um túnel de vento de seção fechada projetado para uso na engenharia civil com a simulação da camada limite atmosférica. A seção onde foram realizados os testes é retangular, com 1300 mm de largura por 900 mm de altura.

Figura B: Gráfico relacionando variância x assimetria e variância x curtose do perfil 535.



Neste ponto 535, os efeitos térmicos já causam perturbação no escoamento, com um aumento da variância.

Figura C: Gráfico relacionando variância x assimetria e variância x curtose do perfil 265.



No ponto 265, a variância se torna mais pronunciada do que no ponto 000, onde o escoamento está mais tempo exposto ao fluxo térmico. Porém no ponto 000, a assimetria e curtose se aproximam mais dos valores encontrados em um regime neutro.