

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

EFEITOS TÉRMICOS SOBRE UM CAMPO DE VELOCIDADES NAS  
IMEDIAÇÕES DE UM MODELO DE EDIFICAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO:  
IMPLEMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO E MEDIÇÕES

por

João Pedro Miranda Anzolch

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, novembro de 2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Anzolch, João Pedro Miranda

Efeitos térmicos sobre uma campo de velocidades nas imediações de um modelo de edificação em túnel de vento: implementação do experimento e medições / João Pedro Miranda Anzolch. -- 2020.

27 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, 2020.

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

João Pedro Miranda Anzolch

EFEITOS TÉRMICOS SOBRE UM CAMPO DE VELOCIDADES NAS  
IMEDIAÇÕES DE UM MODELO DE EDIFICAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO:  
IMPLEMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO E MEDIÇÕES

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

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

Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry

Prof. Sérgio Viçosa Möller

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato a toda a equipe do LAC e a todos que me apoiaram no desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço por suas contribuições e pelo convívio, e também pelo incentivo a atingir meus objetivos.

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2020

**EFEITOS TÉRMICOS SOBRE UM CAMPO DE VELOCIDADES  
NAS IMEDIAÇÕES DE UM MODELO DE EDIFICAÇÃO EM  
TÚNEL DE VENTO: IMPLEMENTAÇÃO DO EXPERIMENTO E  
MEDIÇÕES**

**Anzolch, João Pedro Miranda**

jpanzolch@gmail.com

***Resumo.** O presente trabalho teve por objetivos quantificar a alteração causada em diferentes regiões do escoamento nas imediações de um modelo em escala reduzida de edificação, devido a presença de uma fonte de calor desenvolvida com placas Peltier, bem como a construção de um sistema de movimentação capaz de facilitar as aquisições com anemômetro de fio quente. Os ensaios foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann no Laboratório de Aerodinâmica das Construções na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Com a análise estatística dos dados foi possível mostrar a influência do gradiente térmico sobre escoamentos locais para os mesmos pontos de medição em comparação ao regime neutro. O desenvolvimento do sistema remotamente controlado para posicionamento das sondas se mostrou eficaz, cumprindo com a função de facilitar o trabalho de pesquisa e viabilizar medições com grandes densidades de pontos em períodos relativamente curtos de tempo.*

***Palavras-chave:** Anemômetro de fio quente, Túnel de vento, Efeitos térmicos, Placas Peltier, Sistema de movimentação.*

***Thermal effects on a velocity field near a edification model in Wind tunnel: experiment implementation and measurements***

***Abstract.** The present work aimed to quantify the alteration caused in different flow regions around a reduced scale building model, due to the presence of a heat source developed with Peltier plates, as well as the construction of a drive system capable of facilitating acquisitions with hot wire anemometer. The tests were carried out in the wind tunnel Prof. Joaquim Blessmann at the Laboratory of Aerodynamics of Constructions at the Federal University of Rio Grande do Sul. With the statistical analysis of data it was possible to show the influence of thermal gradient on local flow for the same measurement points in comparison to the neutral regime. The development of the remotely controlled system for positioning probes proved to be effective, fulfilling the function of facilitating the research work and making it possible to make measurements with high dot densities in relatively short periods.*

***Keywords:** Hot wire anemometer, Wind tunnel, Thermal effects, Peltier plates, drive system.*

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$X$	Variável aleatória
$n$	Número de termos

### Abreviaturas e acrônimos

LAC	Laboratório de aerodinâmica das construções
UGS	Universal gcode sender
CNC	Comando numérico computadorizado

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>.7</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO</b>	<b>.8</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>.9</b>
<b>3.1. Instrumentação</b>	<b>.9</b>
<b>3.2. Descrição do experimento</b>	<b>.9</b>
<b>3.3. Fonte de calor</b>	<b>.10</b>
<b>3.4. Construção do pórtico</b>	<b>.12</b>
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>.14</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b>	<b>.20</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>.22</b>
<b>ANEXO – PLATA BAIXA DO TÚNEL DE VENTO</b>	<b>.23</b>
<b>APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DE ANEMÔMETRO</b>	<b>.24</b>
<b>APÊNDICE B – PLANO A 350 MM DA FONTE DE CALOR</b>	<b>.25</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo todo são conduzidos experimentos em túneis de vento para simular modelos em escala reduzida daquilo que se tem interesse. Entretanto, estes experimentos são conduzidos em regime neutro, isto é, na mensuração dos campos de pressões e de velocidades, por exemplo, são considerados apenas os efeitos mecânicos no escoamento. Não obstante, é bastante comum que outros efeitos envolvendo correntes horizontais e verticais, perfis de temperatura e pressão, além da distribuição de umidade, sejam negligenciados em tais experimentos, embora estes sejam fatores que originam a complexidade de simulação da camada limite atmosférica em ensaios em túnel de vento. Dessa forma, uma variedade de regimes pode ser alcançada através dessas manifestações, sendo estas quantidades fisicamente relevantes em vários tipos diferentes de análises dependendo daquilo que se busca.

Há casos em que a proximidade de grandes fontes de calor a edificações pode causar alterações significativas no escoamento do vento sobre uma dada estrutura. Por exemplo, centrais de refrigeração nas imediações de shoppings centers, aeroportos, pavilhões industriais, entre outros, a quantidade de calor gerada é muitas vezes bastante elevada, podendo causar efeitos consideráveis no escoamento. Logo, é ponderável que em um estudo, mesmo que inicial, com a finalidade de verificar a magnitude dessas alterações apresente aspectos novos a respeito do assunto, e, através de uma abordagem metodológica preliminar, seja possível também definir diretrizes da pesquisa para trabalhos futuros.

Os trabalhos de Degrazia et al. (2018) e de Demarco, G et al. (submetido para publicação) apresentaram importantes contribuições para o estudo dos fenômenos térmicos causados por fluxos térmicos verticais devido a presença de radiação solar ou de fontes de calor, tendo sido realizado no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann no LAC-UFRGS, localizado no Campus do Vale. Nesses experimentos o piso do túnel de vento foi equipado como uma placa de metal onde vários elementos Peltier foram acoplados, permitindo assim incluir os efeitos de aquecimento e resfriamento locais do escoamento. As velocidades foram adquiridas com anemômetro de fio quente para escoamentos com magnitude de aproximadamente 1 e 4 m/s. Foram avaliados, além de perfis de velocidade, perfis de temperatura, tanto em regime neutro quanto para regime convectivo, isto é, com um gradiente térmico. A comparação dos dados mostrou que para ambos os casos a mudança dos valores dos perfis de velocidade e temperatura ocorreram em função da altura, sendo possível constatar diferenças causada por um gradiente térmico em comparação ao regime neutro. Em suma, o trabalho mostrou ser possível desenvolver uma metodologia para incluir os efeitos térmicos juntamente aos mecânicos nos experimentos em túneis de vento. Não obstante, ainda foram feitas algumas introspecções sobre o experimento sobre possíveis configurações em trabalhos futuros, como a adição de obstáculos no escoamento, como por exemplo modelos de construções e outros.

Partindo dessa ideia, os objetivos do presente trabalho são de quantificar a alteração causada em diferentes pontos do escoamento devido à presença a uma fonte de calor nas proximidades de uma edificação, bem como o desenvolvimento de um novo sistema capaz facilitar a aquisição de um grande número de pontos nos ensaios. O estudo se deu através da aquisição de perfis de velocidade e de temperatura nas imediações de um modelo de construção genérica, comparando-se então os dados adquiridos em locais distintos do escoamento em regimes neutro e sob ação de um gradiente térmico, sendo empregado para isso um aparato construído para a movimentação das sondas sem a necessidade de paradas para os ajustes das posições.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

Para a análise dos dados adquiridos nos experimentos em túnel de vento foi realizada uma abordagem estocástica levando-se em conta quatro momentos estatísticos, isto é, a tendência central, a dispersão, a assimetria e a curtose. O manual StreamWare Pro Installation and User Guide (2014) da Dantec Dynamics aponta estes momentos como ferramentas básicas de análise dos resultados.

Para caracterizar a tendência central dos valores em uma amostragem é utilizada a média, simbolizada por  $\bar{X}$ , como é mostrada na Equação 1 abaixo.

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

A dispersão de uma variável aleatória é uma medida que representa o qual longe os valores se encontram do valor esperado, dessa forma, para este trabalho, são empregadas a variância amostral, Equação 2, simbolizada por  $S^2$ , e o desvio padrão amostral, Equação 3, dado por  $S$ .

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

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

A variância,  $S^2$ , na Equação 2, também é uma medida da energia cinética turbulenta.

A assimetria, representada na Equação 4, é uma medida de afastamento da posição de simetria da curva de distribuição de frequências dos valores de uma amostra.

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

Valores positivos de assimetria indicam que há um predomínio de valores mais altos do lado esquerdo, logo, a distribuição tem uma “cauda” mais longa a direita das ordenadas. Valores negativos então indicam que os valores mais altos estão à direita enquanto a cauda mais longa se manifesta a esquerda. Por fim, valores de assimetria próximos a zero representam que os valores de uma dada distribuição são relativamente simétricos em ambos os lados da curva.

A curtose é uma medida de forma que caracteriza o achatamento da curva, esta mede a concentração, ou a dispersão, dos valores de um conjunto em relação a tendência central de uma distribuição. A Equação 5 apresenta a expressão para a curtose.

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

Valores de curtose iguais a 3 representam que uma dada distribuição tem o mesmo achatamento que a distribuição normal, sendo esta chamada de mesocúrtica. Para valores maiores que 3, a curva é mais afunilada e concentrada em torno da tendência central que a distribuição normal, sendo chamada de leptocúrtica. Por fim, valores de curtose menores que 3 representam uma forma mais achatada da curva que a distribuição normal, se aproximando de uma distribuição uniforme. Esta última é denominada de platicúrtica.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Instrumentação

As medições foram conduzidas com um anemômetro de fio quente da Dantec Dynamics modelo 55P11. As aquisições foram realizadas com o equipamento *StreamLine Pro CTA system* também do mesmo fabricante, que permite, além da calibração do anemômetro, a correção das medições em relação a temperatura do escoamento com auxílio de uma sonda de temperatura.

A calibração seguiu os passos conforme descritos no manual do fabricante. O anemômetro foi calibrado para a faixa de velocidade de 0,02 a 5 m/s, os detalhes da calibração foram colocados no Apêndice.

#### 3.2. Descrição do experimento

Para os ensaios foi construído um modelo genérico em escala reduzida de uma edificação com as seguintes medidas: 450 mm de largura, 300 mm de comprimento e 200 mm de altura. A escolha do tamanho do modelo foi arbitrária, em razão de este ser um estudo ainda preliminar sobre a simulação de efeitos térmicos em túnel de vento, não sendo assim considerado um estudo de caso, uma vez que não se dispunha de dados ou análises referentes a esta abordagem do problema, e, conseqüentemente, não havendo como se fazer um comparativo com um caso real. Dessa forma, a maneira como o modelo e a fonte de calor foram dispostos foi apenas para se ter uma ideia dos efeitos causados no escoamento por um obstáculo, incluídos os efeitos de geração de calor nas suas imediações.

Com base nos experimentos realizados por Degrazia et al. (2018) e Demarco et al. no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, foram ponderados dois tipos de ensaios: um em regime neutro, com a fonte de calor desligada, e outro em regime convectivo instável, com a fonte ligada. Nesses trabalhos foi visto que, das velocidades de escoamento utilizadas nos ensaios, a que apresentou influências mais visíveis do efeito térmico foi em torno de 1 m/s.

Para este estudo, dadas as constatações anteriores, foi realizado o controle da magnitude da velocidade do escoamento a partir frequência de rotação do motor, este valor foi ajustado em 1 Hz, e corresponde a uma velocidade de aproximadamente 1 m/s. A escolha dessa velocidade para o experimento se deu em razão de se obter uma melhor visibilidade do efeito térmico sobre o escoamento.

O perfil de vento utilizado nos ensaios foi o suave, caracterizado por não apresentar nenhum obstáculo ao escoamento, isto é, não foram utilizados turbilhonadores (gavetas), nem rugosidade (piso). A escolha do vento suave ocorreu em virtude do experimento realizado por Demarco et al., onde foram feitos ensaios com a presença de rugosidade, o que não contribuiu para uma maior nitidez do efeito térmico no escoamento, conquanto apenas aumentou a influência do perfil de vento introduzido pela rugosidade.

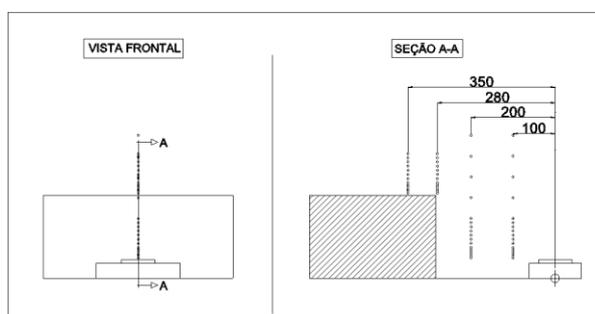
Para as medições foi configurada uma taxa de aquisição de 2048 Hz com 368640 valores, o que corresponde a 3 minutos de tempo de aquisição para cada posição. Para cada ponto, foram então mensurados os valores de velocidade e temperatura obtendo-se assim a série temporal.

A medição foi dividida em quatro planos caracterizados pela distância em relação a fonte de calor ao longo da linha de centro do arranjo. Os dois primeiros planos entre o modelo e a fonte, a 100 e 200 mm de distância do centro da fonte. Para estes dois, a distribuição das posições de medição no eixo vertical seguiu a seguinte forma: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250 e 300 mm. Esses pontos são relativos a parte superior da fonte

de calor que tem 36 mm de altura, dessa forma, esse valor foi inserido nos valores citados, logo, as posições absolutas (em relação ao piso do túnel) foram: 41, 46, 51, 56, 61, 66, 76, 86, 96, 106, 116, 126, 136, 186, 236, 286 e 336 mm. Os outros dois planos se situaram acima do modelo a 280 e 350 mm em relação ao centro da fonte sobre o eixo de simetria. A distribuição para essas posições o foi feita em relação ao topo do modelo e compreendeu os 13 primeiros pontos da discretização anterior, até a altura de 300 mm em relação ao piso do túnel. As posições foram marcadas a 205, 210, 215, 220, 225, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290 e 300 mm de altura.

A Figura 1 apresenta a distribuição de pontos ao longo do arranjo.

Figura 1 – Posições de medição no entorno no arranjo modelo e fonte de calor: vista frontal e corte lateral, seção A-A.



Observa-se a zona de interesse ao longo da linha de centro (simetria) do arranjo, onde as esferas brancas representam a distribuição de pontos de medição para os quatro planos. Na Figura 1 é possível notar a presença de dois blocos: um menor que representa o dissipador e as pastilhas Peltier; e um maior, que representa o modelo. A parte posterior do dissipador que aparece na Figura 1 está situada a 250 mm da face frontal do modelo.

### 3.3. Fonte de calor

Para simular a carga térmica gerada por uma fonte de calor nas imediações de uma estrutura (como grandes aparelhos de ar condicionado, por exemplo), foi idealizada a utilização de placas Peltier montadas sobre um dissipador de calor de alumínio como parte da modelagem dessa fonte. A escolha das placas Peltier como gerador de calor deveu-se ao fato de que com elas é possível ter um melhor controle do fluxo de calor gerado. Não obstante, a fim de aumentar a eficiência das placas Peltier, elas foram associadas em série e montadas em contato sobre a outra, sobre o dissipador.

A Figura 2 mostra as placas Peltier utilizadas do modelo ASA-100 BT.

Figura 2 – Pastilha termoelétrica Peltier



Os dados técnicos das pastilhas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação das placas Peltier

Modelo	Dimensão	Tensão máxima	Corrente Máxima	Potência máxima	Diferença máxima de temperatura	Temperatura máxima de operação
ASA-100 BT	40x40 mm	15,4 V	6 A	61 W	65°C	90°C

Como uma ponderação preliminar, considerou-se que as pastilhas Peltier poderiam apresentar falhas e diferenças durante a operação, sendo assim, como haviam inúmeras dessas à disposição, nenhuma delas previamente avaliada, foram escolhidas algumas delas ao acaso e então avaliadas. Estas foram testadas ligadas diretamente a uma fonte ajustável com um valor fixo de corrente configurado, até que estas alcançassem uma temperatura próxima de seu máximo. Com base nos resultados obtidos foram montadas curvas de temperatura em função do tempo decorrido para cada uma das pastilhas testadas; dos gráficos resultantes foram excluídas aquelas com os valores mais discrepantes em relação as demais. As pastilhas restantes foram correlacionadas e então agrupadas em quatro pares a partir do valor de correlação mais alto para o mais baixo.

Um dos pares, escolhido ao acaso, foi colada com pasta térmica a diferentes dissipadores disponíveis e a composição foi então testada com e sem convecção forçada; a parte fria da associação foi posta em contato com o dissipador enquanto a parte quente ficou voltada para o ambiente. Ligado a fonte ajustável, o par escolhido de placas Peltier foi testado para diferentes valores de correntes até atingir uma temperatura próxima da que seria utilizada nos ensaios (em torno de 75°C). Por fim, foi decidido pelo uso de um dissipador maior, sem um ventilador acoplado, isto é, sem convecção forçada sobre as aletas, uma vez que observou-se apenas uma pequena diminuição da temperatura na superfície das pastilhas, não havendo assim benefício em utilizar um sistema com convecção forçada; essa escolha, além de tornar a composição mais compacta, permitiu também o uso dos quatro pares de placas Peltier de uma vez, ocasionando assim a amplificação do efeito térmico em razão do aumento da área de troca de calor com o escoamento. A montagem final desse aparato é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – (a) Montagem final das placas Peltier sobre o dissipador no túnel de vento; (b) Fontes ajustáveis e multímetro utilizados nos ensaios.



(a)



(b)

Na Figura 3 acima, é possível observar o dissipador de calor preso ao piso do túnel de vento com 3 parafusos, já com as 8 pastilhas Peltier dispostas em pares e ligadas em séries, e coladas com pasta térmica entre si e ao dissipador. Também é notável a presença de um

termopar tipo K preso com fita alumínio sobre a superfície de um dos pares para que se tivesse ao menos uma referência da temperatura; infelizmente haviam apenas 2 termopares disponíveis, sendo este segundo utilizado para a conferência da temperatura nas demais placas. Na imagem acima também aparecem 4 fontes ajustáveis ligadas cada uma a um par diferente de placas Peltier. Sobre uma das fontes foi posicionado um multímetro capaz de fazer a leitura de temperatura do termopar mostrado.

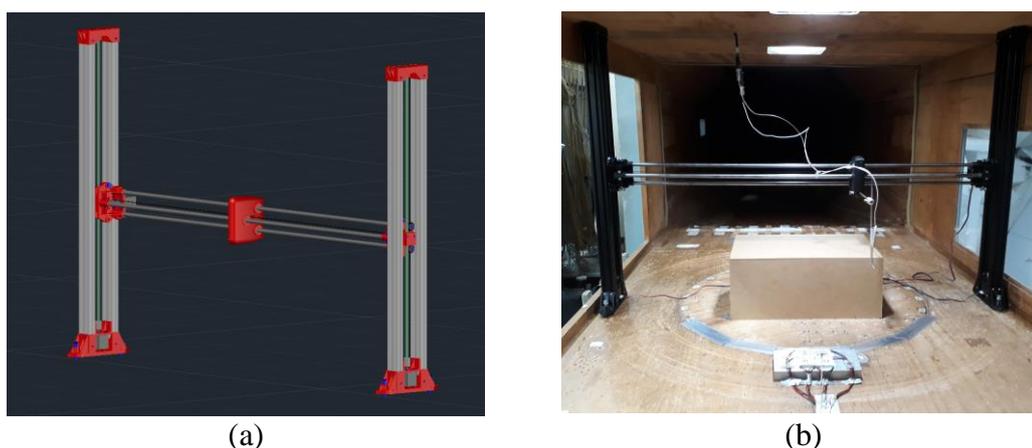
### 3.4. Construção do pórtico

Contudo, a aquisição de inúmeros pontos tornar-se-ia inviável devido à dificuldade de posicionamento da sonda de fio quente em razão do equipamento utilizado no LAC. O equipamento em questão trata-se de antigo coordenômetro manual, com apenas dois eixos (ambos transversais ao escoamento), o qual apresentava a inconveniência de desligar o túnel de vento para cada ajuste de posição. Este ainda representava uma importante fonte de erros em razão de dispor apenas de uma régua graduada acoplada a suas laterais para leitura das posições quando movimentado.

Um novo sistema automatizado para posicionamento das sondas dentro do túnel de vento foi proposto. Foi idealizado inicialmente o projeto de um equipamento com 3 eixos cartesianos, similar a uma impressora 3D. Em razão de dúvidas sobre a robustez da estrutura inicial frente ao escoamento, mesmo em baixas velocidades, se optou por uma estrutura do tipo pórtico com apenas dois eixos de movimentação (vertical e horizontal), ambos transversais ao escoamento. Em virtude da rigidez que este tipo de estrutura poderia apresentar, o desenvolvimento então se deu ponderando um melhor aproveitamento da seção transversal do túnel de vento, bem como em razão de sua potencial utilização em projetos futuros do laboratório, e potenciais melhorias no próprio projeto.

A Figura 4 mostra uma imagem tridimensional da etapa final do projeto desenvolvido para o novo sistema de posicionamento das sondas no interior no túnel de vento.

Figura 4 – (a) Imagem do projeto do pórtico realizado em plataforma CAD; (b) Pórtico montado no interior do túnel de vento.



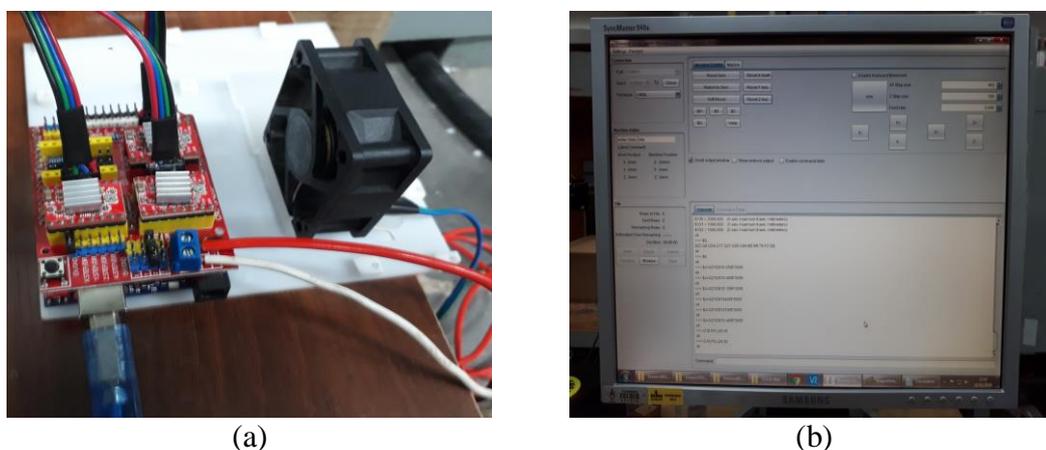
A estrutura foi dividida em duas partes, uma vertical e outra horizontal: a vertical, compostas por duas colunas, as quais seriam presas no piso e no teto do túnel de vento com parafusos; e a horizontal, compostas pelos três eixos (mostrados na Figura 4 acima), os quais foram montados em suportes em suas extremidades onde se acoplam com as colunas. Esses eixos têm diâmetro nominal de 12 mm e possuem 1140 mm de comprimento, foram

fabricados em aço AISI 1045 temperado, eles foram retificados e contam com tolerância dimensional H7 atestada pelo fabricante. Cada coluna é constituída de dois perfis V-Slot 2040 de alumínio com 870 mm de comprimento. As demais peças que aparecem em vermelho na Figura 4 foram projetadas para serem impressas em 3D empregando-se tecnologia FDM, utilizando um polímero denominado PLA (*Ácido Polilático*). Em suma, ainda foram empregados nesse projeto diferentes componentes mecânicos como vários tipos de parafusos, porcas, acoplamento mecânicos, fusos trapezoidais, roldadas de náilon e rolamentos axiais e lineares, além de polias e correias sincronizadoras.

O sistema de controle do pórtico foi realizado através um microcontrolador Arduino Uno através de uma *shield* CNC, foram utilizando três drivers de motores de passo A4988 ligados a três motores de passo NEMA 17, modelo 17HS4401S. Dois nas colunas e um nos eixos para a movimentação de um carro-suporte. Foram empregados dois fusos trapezoidais com diâmetro e passo de 8 mm no eixo vertical (eixo z), um para cada uma das colunas, bem como dois acoplamentos flexíveis entre o eixo dos motores e o fuso. Um carro-suporte foi desenvolvido especialmente para fixação de suportes para o anemômetro de fio quente e a sonda de temperatura; internamente este possui 3 rolamentos lineares Lm12uu apoiados nos três eixos. O movimento do eixo horizontal (eixo x) foi realizado através de uma correia sincronizadora 2GT de passo 2 mm, presa ao carro-suporte, e engrenada a duas polias dentadas com 20 dentes cada.

Foi instalado o *firmware* grbl 1.1h no arduino uno para controlar a movimentação do equipamento, sendo a configuração e o comando do mesmo realizado através do programa UGS. Este último é mostrado, bem como o microcontrolador, são mostrados na Figura 5.

Figura 5 – (a) Microcontrolador Arduino Uno e *Shield* CNC com os *drives* A4988; (b) Interface do programa UGS utilizado para comandar o sistema.



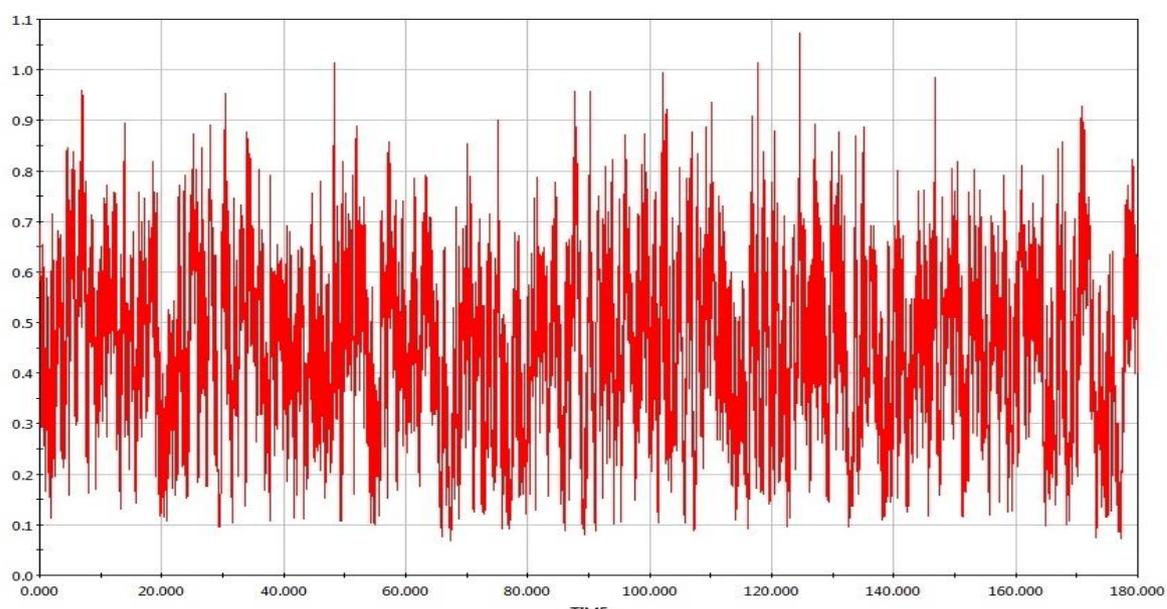
Na Figura 5 são mostrados o microcontrolador Arduino Uno com a *Shield* CNC acoplada juntamente aos *drivers*. Um ventilador foi utilizado para arrefecer a placa bem como seus demais componentes. A composição foi ligada ao computador via cabo USB, sendo possível notar na imagem à direita a interface de controle de posicionamento do pórtico.

Os motores de passo utilizado no projeto têm uma resolução de  $1,8^\circ$  e uma precisão de  $\pm 0,09^\circ$ , isto é, uma variação de 5% do passo, logo, uma volta completa compreende um total de 200 passos. Dessa forma, na *shield* CNC, abaixo dos *drivers*, existem 6 pinos os quais podem ser conectados em pares sob uma lógica *booleana*. A combinação decorrente da conexão desses pinos através de *jumpers* faz com que a resolução dos motores de passo seja aumentada em até 16 vezes, isto é, configurara-se micropassos dentro do sistema. Nesse caso,

os pinos centrais já estavam conectados por um *jumper*, o que representa uma redução de 4 vezes no tamanho de passo do motor. Assim, uma resolução 4 vezes maior representa uma precisão de 0,01 mm na movimentação vertical, e de 0,05 mm na horizontal, devido ao passo de 8 mm dos fusos nas colunas, e ao passo de 40 mm do engrenamento polia e correia sincronizadora, respectivamente. Essa configuração de micropassos foi utilizada uma vez que não seria necessária uma resolução maior para o uso a que foi destinado o equipamento, já que se trata apenas de um primeiro protótipo.

#### 4. RESULTADOS

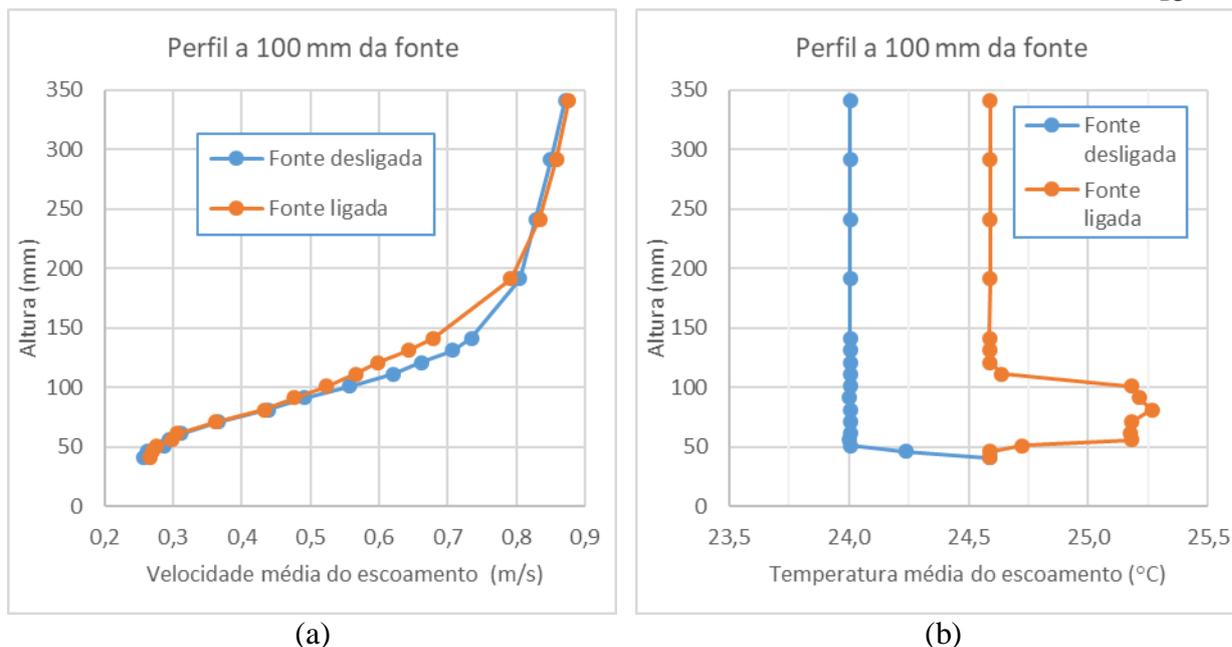
A Figura 6 mostra uma série temporal da velocidade obtida com o anemômetro de fio quente para a posição a 106 mm de altura a 200 mm do centro da fonte de calor, com esta ligada e a uma temperatura de 73°C.



Na Figura 6 é possível observar as flutuações da velocidade, estas variaram de aproximadamente 0,1 m/s até valores superiores a 1 m/s em alguns picos, apresentando uma média de 0,451 m/s.

Como seria uma tarefa muito difícil tirar conclusões analisando-se apenas a série temporal dos dados adquiridos durante os ensaios, optou-se por abordagem estatística das amostras medidas. Esta abordagem buscou-se mostrar mais nitidamente diferenças causadas pela existência de um gradiente de temperatura no escoamento em comparação a um perfil em regime neutro. Dessa forma, a Figura 7 mostra dois gráficos, um com os perfis de velocidade média do escoamento, e outro com os perfis de temperatura, para uma posição a 100 mm do centro da fonte de calor sobre o eixo de simetria do arranjo; em ambos os casos mostrados, nota-se os valores obtidos para regimes neutro, com a fonte de calor desligada, e convectivo, com ela ligada e a uma temperatura média de 75°C.

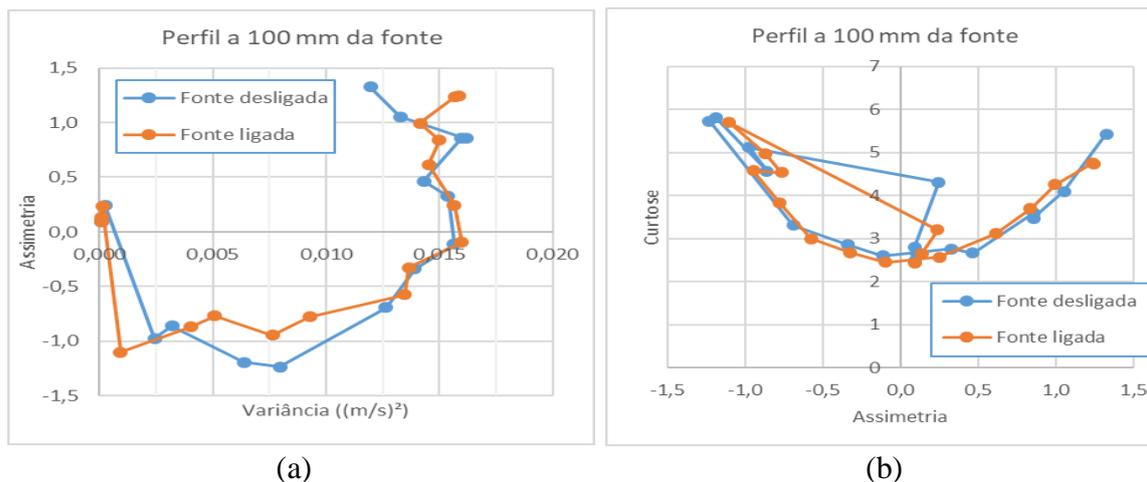
Figura 7 – (a) Velocidade média do escoamento x Altura; (b) Temperatura média do escoamento x Altura.



No gráfico da altura em razão da velocidade, observa-se o rápido crescimento dos valores médios da velocidade para os pontos mais baixos, até atingir uma magnitude próxima do escoamento livre para a frequência de 1 Hz do inversor, correspondente a 1 m/s. Contudo, nota-se uma pequena diferença, comparando-se os casos, para a fonte de calor ligada os pontos compreendidos entre 100 e 150 mm de altura, a média das velocidades foi menor do que em regime neutro, com uma diminuição média de 8,14% para esta faixa, havendo assim um provável “levantamento” da curva em virtude de componentes verticais ocasionadas pelo fluxo de calor advindo da fonte. No gráfico a direita são mostrados dois perfis de temperatura correspondentes a ambos os regimes onde claramente observa-se o efeito térmico. Para valores de altura compreendidos entre 50 até 120 mm é possível notar um salto na distribuição de temperatura em razão fluxo de calor no escoamento, contudo, para os pontos acima dessa faixa, o perfil de temperatura se estabiliza em torno de 24,6°C. Já para o perfil obtido para regime neutro, este se manteve praticamente constante conforme o esperado, a cerca de 24°C, havendo apenas uma variação de 0,5°C, provavelmente devido a fonte de calor não ter sido resfriada o suficiente no início dos ensaios.

A análise dos dados através dos outros três momentos estatísticos é apresentada na Figura 8 abaixo, onde foram plotados os valores de variância, assimetria e curtose para o perfil de velocidades em um plano a 100 mm do centro da fonte.

Figura 8 – (a) Variância x Assimetria; (b) Assimetria x Curtose.



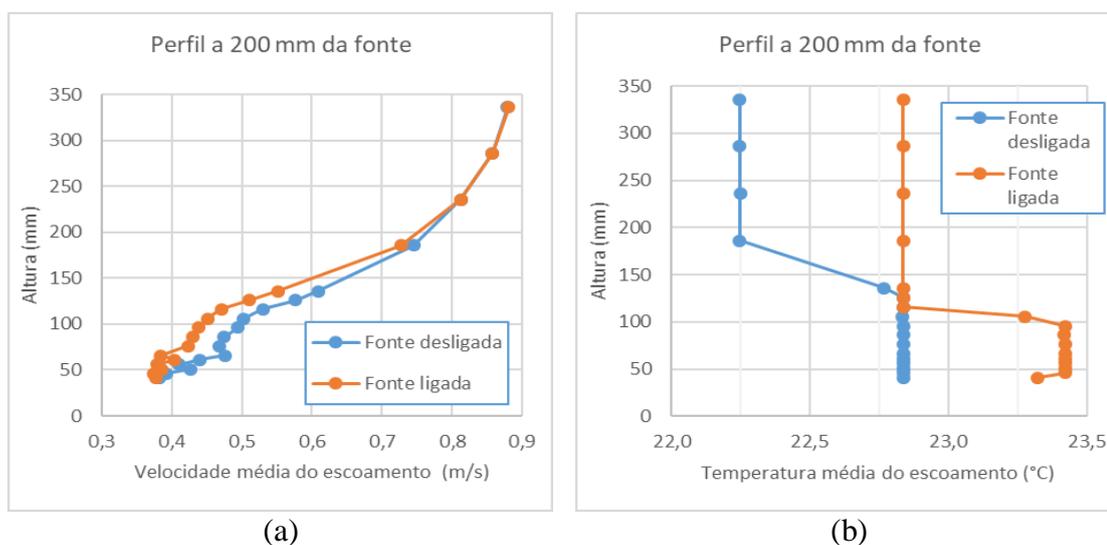
Para os pontos de medições mais baixos a variância foi mais elevada, indicando assim uma maior dispersão dos valores de velocidade nesta região. Nota-se que a assimetria tem um valor positivo nessas alturas, correspondendo a uma cauda mais longa a direita da distribuição das flutuações das amostras; observa-se também que os valores de assimetria diminuem até passarem o eixo das abscissas com o aumento da altura, ou seja, diminui a zero, onde então há uma aproximação simétrica da distribuição, corresponde a uma altura de 80 mm. Não obstante, à medida que foi aumentada a altura de aquisição, a variância decresceu e os valores de assimetria tornaram-se negativos, antes de trocar novamente o sinal para valores muito pequenos da variância, se aproximando de zero. Isso indica que, para os pontos mais altos, a distribuição se aproximou da simetria.

Plotando a curtose em função da assimetria, observa-se no gráfico o formato de uma parábola e a presença de uma espécie de “laço”. Para os pontos mais baixos a assimetria é positiva e decrescente em função do aumento da altura, com o mesmo padrão para a curtose; em seguida, a assimetria tornando-se negativa, porém, com o crescimento do valor da curtose. A curtose por sua vez apresentou valores menores que 3, mostrando assim que a distribuição das flutuações é mais achatada que a curva normal para valores de assimetria próximos de zero. Isso indica um “relaxamento” do escoamento nessa região; outra informação que pode ser retirada desses valores é em relação a distribuição de Maxwell-Boltzmann para um gás com temperatura  $T$ , ou seja, o aquecimento do ar pelo calor emanado pela fonte, nesta região, faz com que essa curva seja mais larga, e assim decaia mais lentamente em razão da velocidade, o que é corroborado através do resultado observado, isto é, o valor de curtose mais baixo.

É visível a diferença dos laços formados pelos pontos no gráfico, na parte superior esquerda da curva para seu centro, sendo a presença destes uma característica da existência de um obstáculo no escoamento, tal como é mostrado pelo elevado valor de curtose nessa região próxima à altura do modelo. O comportamento apresentado pelos laços, bem como os pontos onde esses têm início e fim, indicam que gradiente térmico exerce influência sobre esta região, o que foi mostrado pela diminuição do valor de curtose para os pontos mais elevados. Entretanto, a presença de laço também mostra a necessidade uma maior discretização para a região, isto é, mais pontos seriam necessários para se caracterizar este fenômeno observado.

A Figura 9 mostra os perfis de velocidade e temperatura para um plano a 200 mm do centro da fonte de calor sendo mostrado em ambos os gráficos mostrados os regimes neutro e convectivo. Nesse ensaio a fonte de calor foi mantida a uma temperatura média de  $73^{\circ}\text{C}$ .

Figura 9 – (a) Velocidade média do escoamento x Altura; (b) Temperatura média do escoamento x Altura.

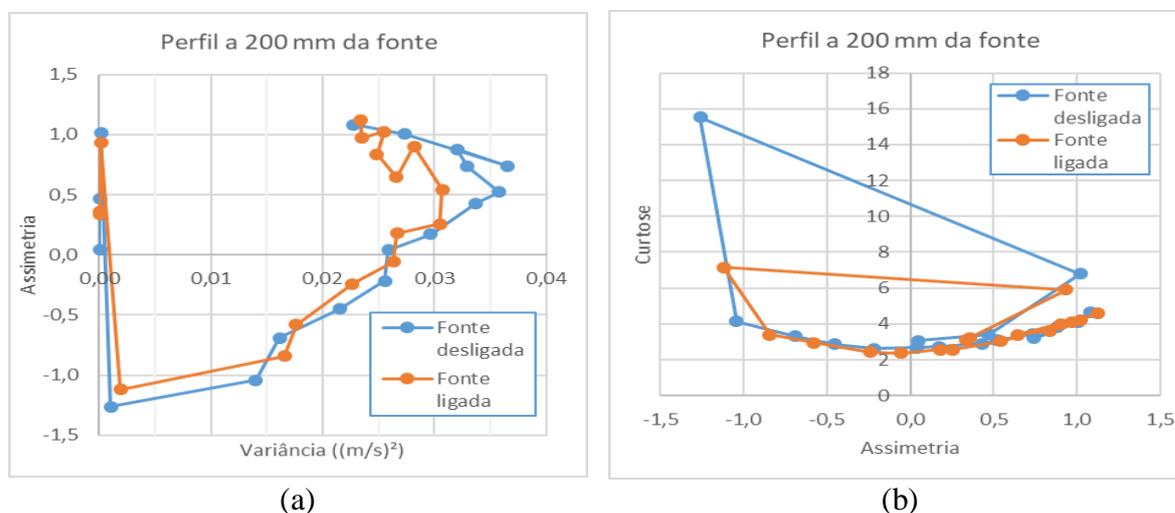


Os perfis de velocidade apresentaram diferenças mais nítidas neste plano, principalmente para os pontos que abrangem a faixa de 50 a 150 mm. Essa diferença desaparece completamente para as medições acima de 236 mm de altura.

Para os perfis de temperatura foram obtidas distribuições semelhantes as anteriormente mostradas para o plano a 100 mm do centro da fonte de calor. Contudo, pode-se notar uma variação de quase  $0,6^{\circ}\text{C}$  entre as posições abaixo de 150 mm para regime neutro, isso se deve, possivelmente em razão da fonte de calor estava ligeiramente mais quente que a temperatura registrada para o escoamento livre do túnel de vento, sendo esta uma possível explicação para o fenômeno observado. Entretanto, o perfil obtido com a fonte de calor ligada mostrou nitidamente a alteração causada pelo fluxo térmico nos valores de temperatura para uma altura de até 106 mm, se mantendo constante a  $22,8^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 10 abaixo apresentada novamente a análise das medições através da variância, assimetria e curtose para o perfil de velocidades em um plano transversal a 200 mm do centro da fonte em ambos os regimes.

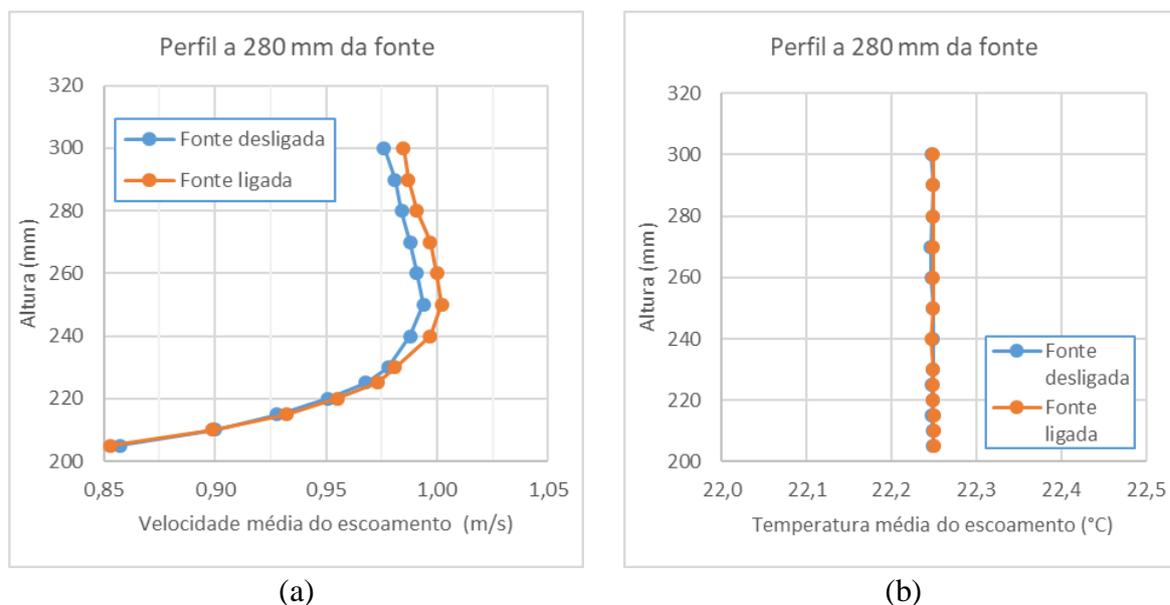
Figura 10 – (a) Variância x Assimetria; (b) Assimetria x Curtose.



Para os pontos mais baixos medidos em regime neutro, os valores de variância foram relativamente maiores do que em regime convectivo, muito embora ambas as curvas mantenham um formato similar e característica semelhantes quanto ao caso anterior, havendo duas trocas de sinal para a assimetria com a diminuição das dispersões. Para os pontos mais altos medidos no escoamento, tanto a variância quanto a assimetria aproximaram-se a zero. A curtose em razão da assimetria apresentou uma concavidade menor, isto é, valores mais baixos de curtose para as extremidades do intervalo de assimetria calculados, ainda que elevados. Mais uma vez é possível identificar a formação de uma espécie de “laço” a partir da posição a 186 mm de altura, onde há um súbito salto do valor da curtose para 15,53 em regime neutro, seguido de uma inversão de sinal da assimetria, e uma aproximação ao valor de próximo de 3 onde a assimetria se aproxima de zero. Isto indica novamente que há uma tendência ao equilíbrio mecânico na região mais alta. O fenômeno chamado de laço observado aqui é bem maior que o mostrado para o caso anterior, dessa forma, pode-se dizer que a influência do obstáculo – o modelo neste caso – é bem maior em razão de sua proximidade com linha de medição, fazendo com o escoamento apresente uma concentração bem maior das flutuações mostrado pelo valor elevado de curtose; assim, o efeito causado pelo calor foi a diminuição desse mesmo valor para menos da metade do observado em regime neutro. Em suma, para ambos os gráficos foi visto que há a necessidade de uma melhor discretização, sendo precisos mais pontos a fim de uma melhor avaliação dos comportamentos observados.

A Figura 11 mostra os perfis de velocidade e temperatura obtidos para uma distância de 280 mm do centro da fonte de calor para os regimes neutro e convectivo. Nesse ensaio a fonte foi mantida a uma temperatura média de 80°C na pastilha de referência; as demais apresentaram temperaturas um pouco mais baixas.

Figura 11 – (a) Velocidade média do escoamento x Altura; (b) Temperatura média do escoamento x Altura.

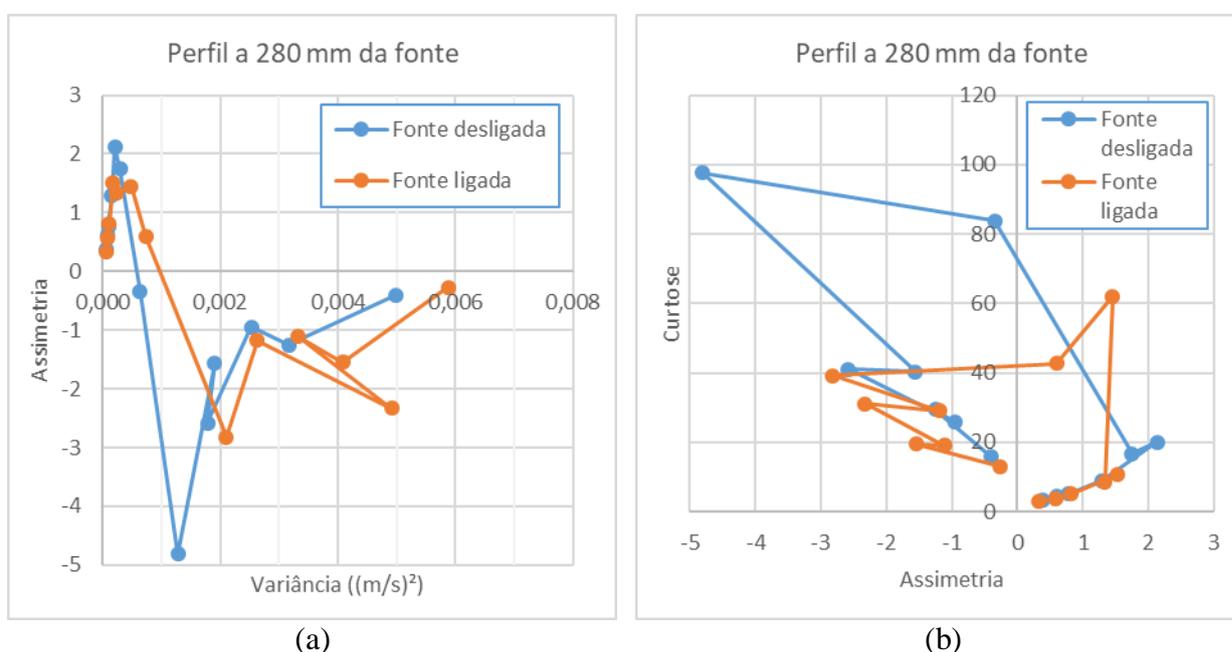


Para estes perfis foram analisados pontos acima da altura do modelo, a uma distância de 20 mm a frente de sua face. Os resultados mostraram que para esta configuração não são observáveis variações significativas entre os perfis de temperatura para a distribuição ao longo da altura, o que mostra que praticamente não há mais efeitos para esta região, tal que

para a velocidade nota-se apenas uma diferença diminuta entre seus valores. É observável que um dos perfis é levado mais a frente no sentido positivo do eixo da velocidade devido a uma provável influência do calor gerado, ainda que essa diferença seja da ordem de 0,01 m/s. Embora se possa dizer que este valor esteja próximo da resolução do equipamento, verifica-se que não se trata de um erro ocasionado pela natureza aleatória das flutuações, uma vez que estes valores resultantes do cálculo da média das amostras apresentaram o mesmo comportamento, exceto para a posição mais baixa; sendo assim, possível – mas improvável – que seja parte de um erro sistêmico do equipamento; entretanto, dadas as observações feitas nos demais casos, isso ainda pode ser atribuído ao efeito causado pelo gradiente térmico no escoamento.

A Figura 12 abaixo a análise estatística dos valores através da variância, assimetria e curtose para os perfis de velocidades observados anteriormente a uma distância de 280 mm do centro da fonte calor

Figura 12 – (a) Variância x Assimetria; (b) Assimetria x Curtose.



O comportamento da assimetria em função da variância foi semelhante aos observados anteriormente para os perfis entre a fonte de calor e o modelo, porém, a variância apresentou valores bem menores para esta região, havendo apenas uma inversão de sinal para a assimetria em razão da elevação da altura das medições; essa troca de sinal é seguida de uma elevação do valor da assimetria e de uma súbita queda, com seu valor tendendo a zero quando a variância se torna muito pequena. Diferentemente dos casos anteriores, os valores de curtose das amostras apresentaram valores extremamente elevados, chegando a 97,67 para a altura de 230 mm em regime neutro, diminuindo para as posições subsequentes mais elevadas, até um valor mínimo próximo de 3, a 300 mm, para ambos os regimes; isso novamente se reflete em uma aproximação a um ponto equilíbrio mecânico dado pela semelhança das características desse ponto, dados os valores de assimetria e curtose, com a distribuição normal. A diminuição dos valores dos pontos onde a curtose era mais elevada, claramente podem ser atribuídos a efeitos térmicos no escoamento em razão da variação das grandezas envolvidas, que baixaram de valores da ordem de quase 100 para em torno de 40, em alguns pontos. É possível notar que as curvas de ambos os gráficos se diferenciam claramente, havendo

variações repentinas entre várias posições, necessitando assim de mais pontos de medição para uma compreensão dos fenômenos envolvidos.

As medições executadas acima do modelo para um plano de 350 mm do centro da fonte de calor, apresentaram nitidamente interferências externas em razão da variação da temperatura do ambiente. As medições foram realizadas ao longo de um dia em que a amplitude térmica fora bastante grande, sendo perceptível nos perfis de temperatura obtidos mais tarde no tratamento dos dados, e nas análises. Em razão disso, as aquisições feitas, bem como a análise do último plano de medições é apresentada no Apêndice B – Plano a 350 mm da fonte de calor.

Por fim, uma análise superficial pode ser feita em relação ao sistema de posicionamento automatizado construído como parte desse estudo, em substituição ao antigo existente no LAC. Para cada medição foram dispendidos 3 minutos, de um total de 60 pontos. Cada ponto foi adquirido duas vezes levando-se em conta os regimes. Dessa forma, pode-se considerar que são necessários apenas alguns segundos para comandar o pórtilo para uma nova posição através da interface de controle, contudo, devido ao tratamento prévio dos dados recém adquiridos, e da tomada de leitura em alguns aparelhos durante este processo, pondera-se o tempo adicional de até 2 minutos. Pode-se deduzir então que no total seriam gastos 600 minutos, isto é, apenas 10 horas para a aquisição de todos os dados apresentados neste trabalho. Porém, na prática, observando-se a faixa de horário dos arquivos gerados para cada ensaio, que foram necessárias aproximadamente 9,5 horas para a medição desses mesmos pontos, sem contar com o tempo de preparação envolvido entre cada experimento. Logo, chega-se a uma estimativa de 4 minutos e 45 segundos para a medição de cada ponto. Não obstante, é bastante difícil estimar o tempo necessário para a obtenção desses mesmos pontos utilizando o coordenômetro existente no LAC, mas pode-se dizer que seria ao menos de algumas vezes maior do que o que foi obtido com o sistema utilizado, em razão de uma série de problemas de movimentação e posicionamento não apenas deste complexo aparato, mas também das sondas no interior do túnel de vento.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho introduziu aspectos novos de pesquisa a respeito dos efeitos térmicos simuláveis em experimentos em túneis de vento, tendo sido feitas análises comparativas entre os regimes neutro e térmico com a adição não apenas de uma fonte de calor, mas de um obstáculo no escoamento. Não obstante, o desenvolvimento de um sistema de movimentação remota das sondas dentro do túnel de vento, sem a necessidade de paradas e ajustes desnecessários, tornou o trabalho não somente mais fácil, como também viabilizou a medição de uma grande quantidade de pontos em períodos relativamente curtos de tempo; a construção deste aparato, denominado simplesmente de pórtilo, tornar-se-á extremamente útil em experimentos futuros, tanto pela facilidade de se realizar medições com maiores densidades de pontos, quanto pelo encurtamento do tempo total de experimento em pelo menos uma ordem de grandeza.

Com a análise estatística básica recomendada através de quatro momentos estatísticos, foi possível mostrar os efeitos causados pelo calor no escoamento nas imediações no modelo de edificação, bem como as alterações nas distribuições das amostras obtidas e a relevância dos fenômenos térmicos nas suas imediações; logo, mostrou-se que o objetivo principal proposto para o trabalho foi cumprido, sendo observada a manifestação dos efeitos térmicos juntamente aos mecânicos causados pela introdução de um obstáculo no escoamento. Entre outras perspectivas, contudo, verificou-se que a área de troca térmica para este estudo foi bastante inferior a utilizada nos trabalhos de Degrazia e Demarco, onde foi empregado um

disco de 80 cm de diâmetro; essa área bastante superior, bem como o maior comprimento existente para o desenvolvimento térmico do escoamento, e sem obstáculos, contribuíram para uma maximização do efeito estudado por eles. Dessa forma, a área de troca térmica reduzida deste experimento pode ter ocasionado alguns problemas relativos ao desenvolvimento térmico do escoamento – não tendo sido suficientemente desenvolvido – e também mecânico, com a geração de vórtices e recirculações ocasionados pela presença da fonte de calor a montante do modelo

Em suma, o trabalho apresentado abre perspectivas para novos experimentos, com novas sequências de medições com ênfase em diferentes segmentos, ou seja, novas abordagens ao problema. Verificou-se a necessidade de uma melhor discretização das zonas de interesse, englobando um número maior de pontos em certas regiões onde essas se mostraram insuficientes para a caracterização de certos comportamentos observados nos gráficos. Também pode ser relatado a necessidade de uma verificação do quão distante a situação atual experimentada se difere de um regime estacionário, abrindo caminho para uma nova série de análises, como por exemplo, a espectral. Pode assim ser recomendado a análise dos dados através da transformada de Hilbert, em razão de que esta leva em conta efeitos não lineares e transientes, contudo, sem descartar hipóteses mais simples, como a transformada de Fourier que, apesar de ser utilizada para regimes estacionários com efeitos lineares, pode, por sua vez, fornecer informações importantes sobre o objeto de estudo, ou seja, os efeitos térmicos no escoamento. Outras recomendações que podem ser feitas em prol de análises futuras levam em consideração a medição de perfis deslocados em relação a linha de simetria do arranjo; locais mais próximos das bordas, e também atrás do modelo para a observação das zonas de recirculação.

A melhoria do pórtico é uma alternativa viável e que apresenta, sem dúvidas, grandes perspectivas futuras com o acréscimo de um eixo longitudinal ao escoamento. A introdução de mais um eixo na estrutura permitirá a movimentação tridimensional das sondas, ao invés de em um plano apenas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GRBL. Versão 1.1h. [S.I.], github, 2019. Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl>. Acesso em: 2 set. 2020.

UGS – Universal Gcode Sender. Versão 2.0 classic. [S.I.], github. Disponível em: [https://winder.github.io/ugs\\_website/](https://winder.github.io/ugs_website/). Acesso em: 9 set. 2020.

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>.

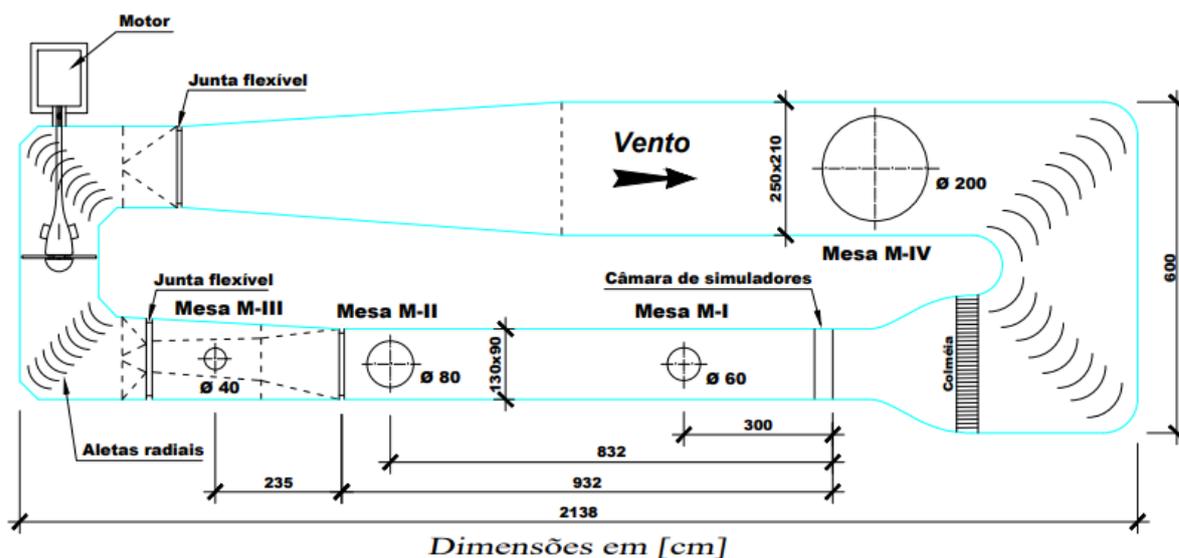
Demarco, G. *et al.* Analysis of roughness and thermal effects on turbulent characteristics in wind tunnel experiments. (obtido através de comunicação particular., submetido para publicação, 2020)

**StreamWare Pro Installation and User Guide**. Skovlunde: Dantec Dynamics A/S, 2014.

## ANEXO – PLANTA BAIXA DO TÚNEL DE VENTO

A Figura 13 mostra a planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann onde foram executados os ensaios para este trabalho.

Figura 13 – Planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim blessmann.



O experimento ocorreu na Mesa II na seção convergente do túnel de vento, conforme aparece na Figura 13 acima. Este é um túnel de vento de seção fechada de baixa velocidade projetado para uso na engenharia civil; a seção onde foram realizados os ensaios é retangular, com 1300 mm de largura por 900 mm de altura.

## APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DE ANEMÔMETRO

O equipamento *StreamLine Pro CTA system* da Dantec Dynamics apresenta uma taxa de aquisição de até 250 kHz, seu calibrador é capaz de atingir valores muito baixos de escoamento, 0,02 m/s com o bocal mais aberto, até velocidades bastante elevadas de até 300 m/s, com o bocal menor. A Figura 14 mostra a calibração realizada no LAC.

Figura 14 – Calibração de anemômetro de fio quente na área de ensaios do túnel de vento.

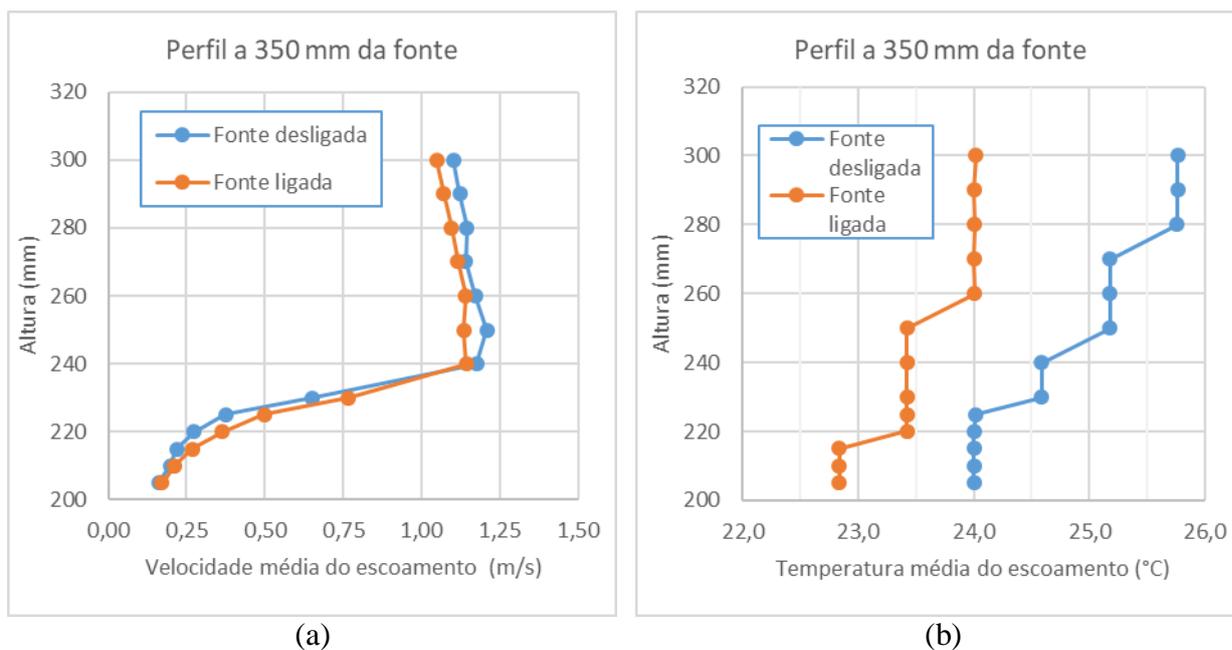


Como é mostrado na Figura 14, a calibração do anemômetro foi feita através do *Software* da DANTEC, *StreamWare Pro*, com auxílio de computador conectado ao calibrador via USB. Foi seguido um procedimento de configuração do programa antes da calibração do anemômetro de fato ser efetuada, onde são definidos inicialmente a taxa de aquisição e a quantidade de amostras, que por padrão é de 1024 Hz e de 16384 valores. Na sequência foram requisitados a faixa de velocidade que se deseja calibrar o anemômetro, o número de pontos, e tipo de distanciamento entre estes pontos. A faixa de velocidade escolhida para este experimento foi de 0,02 a 5 m/s, com 20 pontos de calibração e distanciamento linear. No entanto, uma das dificuldades encontradas durante a calibração foi que não haviam bocais específicos para a faixa de velocidades escolhida, havendo então a necessidade de troca durante a operação. Dessa forma, foi necessário ajustar no programa que seria utilizado o maior bocal para os pontos iniciais da calibração; este bocal abrange a faixa de 0,02 a 0,5 m/s. Na sequência, uma vez que a velocidade de escoamento do calibrador ultrapassou esta faixa, o programa foi pausado e bocal foi trocado, e novamente o programa foi ajustado para o bocal da faixa seguinte, o qual apresentava uma abertura bem menor, sendo indicado para velocidades de 0,5 a 60 m/s. Durante a calibração o programa executa a análise de erro do anemômetro em relação a corrente de referência dada pelo calibrador, por padrão o valor do erro analisado deve ser inferior a 2%. Por fim, o programa cria uma pasta com o arquivo “raiz” o qual contém os parâmetros de calibração do anemômetro; este arquivo foi posteriormente utilizado pelo programa para as aquisições do experimento.

## APÊNDICE B – PLANO A 350 MM DA FONTE DE CALOR

A Figura 15 mostra os perfis de velocidade e temperatura obtidos para uma distância de 350 mm do centro da fonte de calor para ambos os regimes. Nesse ensaio a fonte foi mantida a uma temperatura média de 80°C.

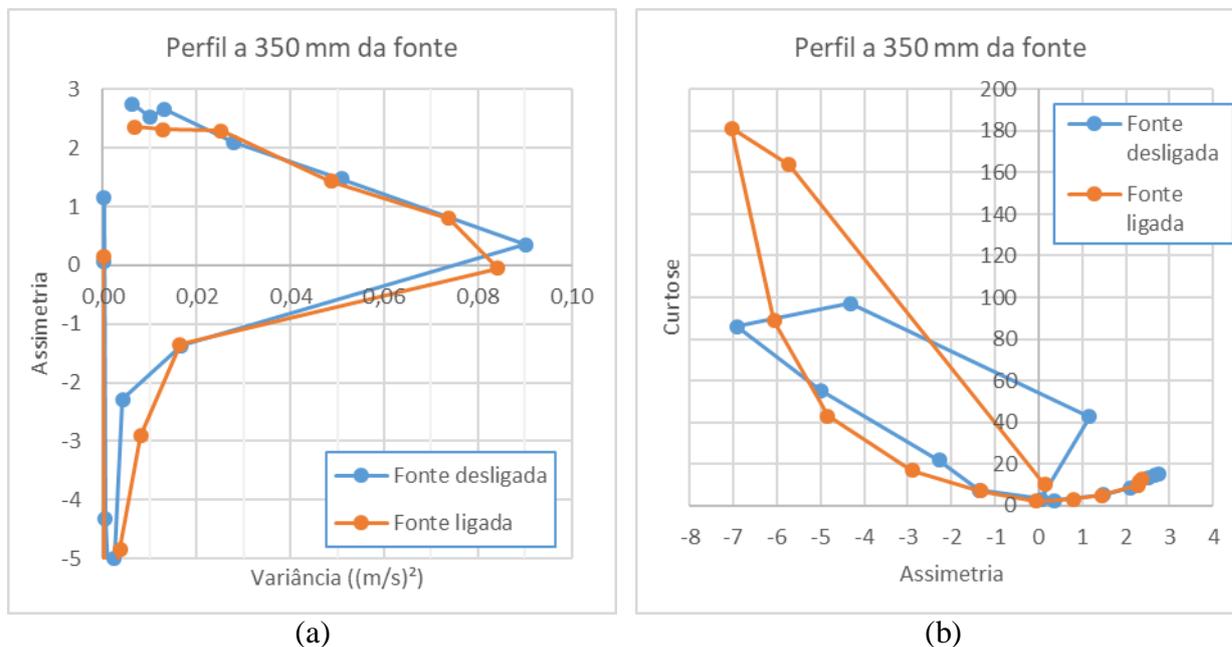
Figura 15 – (a) Velocidade média do escoamento x Altura; (b) Temperatura média do escoamento x Altura.



Para os perfis de temperatura foram obtidas distribuições que apresentam degraus, o que por sua vez mostra que houve uma variação de temperatura bastante grande no ambiente, causando assim diferenças indesejadas, tal como a temperatura do perfil de temperatura, onde se tem fonte de calor, ser mais baixa do que a em regime neutro, sabe-se que para esta região praticamente não há mais efeitos térmicos significativos, inutilizando assim estas aquisições do ponto de vista do experimento.

A Figura 16 abaixo a análise estatística dos valores através da variância, assimetria e curtose para os perfis de velocidades observados anteriormente a uma distância de 280 mm do centro da fonte calor.

Figura 16 – (a) Variância x Assimetria; (b) Assimetria x Curtose.



O comportamento da assimetria em função da variância, bem como o da curtose em razão da assimetria não podem, para este caso, ser atribuídos significado em virtude das ponderações supracitadas. Dessa forma, estes gráficos são mostrados aqui a título de curiosidade. Vê-se que a curtose para regime convectivo foi muito mais alta que em regime neutro, contrariando assim o que foi observado para os demais casos.