

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RESFRIAMENTO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS  
POR JATOS SINTÉTICOS TANGENCIAIS

MARINO TRISCH

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

São Leopoldo, dezembro de 2015

RESFRIAMENTO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS  
POR JATOS SINTÉTICOS TANGENCIAIS

MARINO TRISCH

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee

Coorientadora: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

São Leopoldo, dezembro de 2015

T837r Trisch, Marino.  
Resfriamento de componentes eletrônicos por jatos sintéticos tangenciais / Marino Trisch. – 2015.  
104 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

"Orientador: Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee ; coorientadora: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti."

1. Jato sintético. 2. Número de Nusselt. 3. Número de Strouhal. 4. Resfriamento eletrônico. I. Título.

CDU 621

Trabalho desenvolvido para o programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, financiado por bolsa de estudos concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, por meio da modalidade do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares Cursos Novos – PROSUP/Cursos Novos.

## AGRADECIMENTOS

Nos agradecimentos, os autores costumam destacar a dificuldade em mencionar todos aqueles que, de uma forma ou outra, participaram da realização do trabalho. Neste momento em que desempenho esta tarefa entendo esta dificuldade, em saber quais palavras utilizar e de que forma mencionar as pessoas que contribuíram de alguma forma para que este objetivo fosse alcançado.

Iniciando os agradecimentos, é imprescindível citar os docentes do curso e funcionários da secretaria do PPG de engenharias da Unisinos, alguns em especial pelo contato mais constante e necessário devido às disciplinas que cursei, e na prontidão característica na solução de dificuldades em documentação e demais obrigações como estudante. Agradeço a atenção dispensada desde a busca por informações em relação ao curso, recepção diferenciada no momento da inscrição, passando pela entrevista com os professores e desenvolvimento das disciplinas; todos os envolvidos, professores e funcionários, estão de parabéns.

Em especial, cito o Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee pela oportunidade que me proporcionou ao aceitar a tarefa de orientador, instigando em mim a busca por resultados satisfatórios e confiando nas tarefas desenvolvidas e resultados por mim obtidos. Coorientadora do trabalho, a Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti, recebe meu reconhecimento pela colaboração no experimento desenvolvido, como revisora desta dissertação e também do artigo submetido e apresentado por mim em congresso internacional de engenharia.

Quanto à minha participação no mestrado, agradeço à CAPES que o viabilizou financeiramente através de bolsa, e à estrutura física disponibilizada pela UNISINOS.

É necessário mencionar a troca de conhecimentos e união dos colegas de turma, que atuando em diferentes áreas do conhecimento foram essenciais no enriquecimento dos meus conhecimentos e no desenvolvimento das atividades propostas pelos professores.

Agradeço aos que colaboraram no desenvolvimento e montagem do experimento, ao amigo Adriano Menezes da Silva que colaborou com sua habilidade no software SolidWorks e ao Sr. Norberto Klauck da empresa Sullaser pela ajuda nas diversas vezes que o procurei para confecção de peças em acrílico. Na implementação eletrônica e de controle, agradeço ao professor e amigo Ewerton Artur Cappelatti de conhecimento e carisma característicos, que já havia me orientado na graduação e agora incentivou no mestrado. Também agradeço ao agora amigo Francisco Betim que conheci devido seu conhecimento em programação e grande vontade de “colaborar aprendendo”.

Tenho que agradecer ao SENAI RS, mais especificamente à supervisão do ISI SIM Senai Cetemp de São Leopoldo, representada pelo Sr. Silvio Viegas, pela confiança ao ceder equipamentos eletrônicos essenciais ao desenvolvimento do experimento, que propiciou a execução dos procedimentos em qualquer dia e horário, mantendo a bancada experimental montada ininterruptamente inclusive aos finais de semana e feriados; isto garantiu agilidade na execução dos testes e na coleta de dados.

Por fim, e dizem que o melhor deixamos para o final, agradeço minha família, principalmente ao meu pai Nadir e minha mãe Zulma, que sempre apoiaram e continuam apoiando como podem na formação pessoal e profissional dos filhos, também às minhas manas Cristina e Simone pelas constantes e excelentes contribuições que fizeram e continuam fazendo em minha vida. A meus cunhados Mateus e Víctor pelo incentivo direto ou indireto.

É impossível esquecer de mencionar meu sobrinho e afilhado Murilo, que nasceu e vem proporcionando alegria a toda família desde meu primeiro mês de mestrado, e alguns momentos diários e finais de semana com ele foi fundamental para recarregar minhas energias.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental relacionado ao resfriamento de dispositivos eletrônicos utilizando jatos sintéticos direcionados de modo que o jato flua tangencialmente à superfície aquecida, utilizando para isso uma bancada experimental especialmente desenvolvida. Para o desenvolvimento deste trabalho foram analisados outros estudos relacionados ao assunto, simulados e experimentais, utilizando neste caso um alto-falante como membrana montada em conjunto com a estrutura da bancada para formar a câmara e conseqüentemente o gerador de jatos sintéticos. O jato sintético gerado irá resfriar um elemento de aquecimento que simula o funcionamento de um dispositivo eletrônico, posicionado tangencialmente em diversas posições de distância em relação à saída do jato.

Os procedimentos de teste de resfriamento foram realizados na bancada experimental em diversos modos de funcionamento do elemento de aquecimento, utilizando temperatura média de 80 °C semelhante à temperatura máxima de trabalho de dispositivos eletrônicos.

Para a geração do jato sintético foram aplicados sinais senoidais em frequências de pulsação entre 20 e 120 Hz e com amplitude de aproximadamente  $7,52 V_p$ , que resulta em 20 W<sub>rms</sub> de potência no gerador de jatos sintéticos. Nos testes utilizando potência fixa do elemento de aquecimento, a temperatura no elemento de aquecimento é monitorada. Em outro modo de teste, foi mantida uma temperatura constante e monitorada a potência máxima correspondente dissipada no elemento de aquecimento.

Por fim, também foi realizado comparativo entre resfriamento eletrônico utilizando jatos sintéticos e método tradicional com a utilização de ventiladores, onde são utilizados três diferentes tamanhos de *coolers* acoplados à bancada experimental e arrefecendo o mesmo elemento de aquecimento, verificando e comparando velocidades e rendimento entre os métodos de resfriamento.

Palavras-chave: Jato sintético, número de Nusselt, número de Strouhal, resfriamento, eletrônico, experimental.

## ABSTRACT

This paper presents an experimental study related to the cooling of electronic devices using synthetic jets directed so that the jet flows tangentially to the heated surface. A custom-built experimental test bench especially developed based on other studies related to the subject. In this case, a speaker was used as a membrane and installed in a cavity in the test bench to form the synthetic jet generator. The synthetic jet cools a heating element that simulates the operation of an electronic device, positioned tangentially at various distance in relation to the exit plane of the synthetic jet.

Cooling test procedures were performed in the custom-built experimental test bench in various operation modes of the heating element, using an average temperature of 80 ° C which is similar to the operating temperature of electronic devices.

To generate the synthetic jet, sinusoidal input signals were applied with frequencies between 20 and 120 Hz and with amplitude of approximately 7.52  $V_p$  which resulted in 20 Wrms power consumed by generator. In tests using a fixed power dissipated by the heating element, the temperature drop is monitored in the heating element. In the other test mode, the temperature on the heating element was set at a constant value the maximum power dissipated in the heating element was measured.

Finally, comparisons were also performed between the cooling performance of synthetic jets and the conventional method with the use of three different coolers sizes. The same tests were performed on the same heating element and the corresponding velocities and cooling performance between the two methods were compared.

Keywords: synthetic jet, Nusselt number, Strouhal number, cooling, electronic, experimental.



## LISTA DE ABREVIATURAS

|      |  |
|------|--|
| ADC  | Conversor Analógico Digital  |
| CAD  | Desenho Assistido por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> )          |
| CFD  | Dinâmica Computacional dos Fluidos ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) |
| CFM  | Pés Cúbicos por Minuto ( <i>Cubic Feet per Minute</i> )                    |
| CPU  | Unidade Central de Processamento ( <i>Central Processing Unity</i> )       |
| DDP  | Diferença de Potencial ( <i>Potential Difference</i> )                     |
| DPE  | Equipamento de processamento de dados ( <i>Data Processing Equipment</i> ) |
| LCD  | Display de Cristal Líquido ( <i>Liquid Crystal Display</i> )               |
| PIV  | Velocimetria por Partículas ( <i>Particle Image Velocimetry</i> )          |
| PWM  | Modulação por Largura de Pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )           |
| RMS  | Valor Eficaz Médio Quadrático ( <i>Root Mean Square</i> )                  |
| SJA  | Atuador de Jatos Sintéticos ( <i>Synthetic Jet Actuator</i> )              |
| USB  | Porta Universal Serial ( <i>Universal Serial Bus</i> )                     |
| ZNMF | Fluxo de Massa Líquida Zero ( <i>Zero-Net-Mass-Flux</i> )                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Nomenclatura

$A$  – Área [m<sup>2</sup>]

$A_s$  – Área da superfície [m<sup>2</sup>]

$C_p$  – Calor específico [J/(kg.K)]

$D$  – Diâmetro [m]

$D_h$  – Diâmetro hidráulico [m]

$f$  – Frequência de oscilação da membrana [Hz]

$h$  – Coeficiente de Transferência de Calor por convecção [W/(m<sup>2</sup>.K)]

$H_c$  – Altura da cavidade [m]

$H_o$  – Altura do orifício [m]

$H_x$  – Altura do duto de escoamento do jato sintético [m]

$Hz$  – Frequência [Hz]

$k$  – Condutividade térmica [W/(m.K)]

$L$  – Comprimento [m]

$L_c$  – Comprimento de curso adimensional [-]

$L_o$  – Distância de deslocamento do fluido durante a ejeção [m]

$L_x$  – Distância axial [m]

$\dot{m}$  – Vazão mássica [kg/s]

$Nu$  – Número de Nusselt [-]

$\overline{Nu}$  – Número de Nusselt médio [-]

$P$  – Perímetro [m]

$q$  – Taxa de transferência de calor [W/m<sup>2</sup>]

$Re$  – Número de Reynolds [-]

$St$  – Número de Strouhal [-]

$T$  – Temperatura [°C]

$T_S$  – Temperatura da Superfície Aquecida [°C]

$T_\infty$  – Temperatura ambiente [°C]

$U_o$  – Velocidade média de saída [m/s]

$v$  – Velocidade [m/s]

$V$  – Tensão elétrica [V]

$V_{cc}$  – Tensão elétrica em corrente contínua [V<sub>cc</sub>]

$V_{ca}$  – Tensão elétrica em corrente alternada [V<sub>ca</sub>]

$V_{out}$  – Tensão elétrica de saída [V]

$V_p$  – Tensão elétrica de pico [ $V_p$ ]

$V_{rms}$  – Tensão elétrica eficaz [ $V_{rms}$ ]

$W_{rms}$  – Potência eficaz média [ $W_{rms}$ ]

$x$  – Direção longitudinal de crescimento do jato [m]

$z$  – Direção transversal de crescimento do jato [m]

### *Símbolos Gregos*

$\Delta$  – Variação [-]

$\rho$  – Massa Específica [kg/m<sup>3</sup>]

$\nu$  – Viscosidade Cinemática [m<sup>2</sup>/s]

$\tau$  – Período de oscilação da membrana [s]

$\mu$  – Viscosidade dinâmica [Pa . s]

$\alpha$  – Difusividade térmica [m<sup>2</sup>/s]

$\Omega$  – Resistência elétrica [ $\Omega$  (Ohm)]

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Previsão da demanda eletrônica futura e da complexidade dos projetos térmicos.....   | 16 |
| Figura 2.1 – Diagrama de operação de jatos sintéticos. (a) Componentes básicos do dispositivos. (b) representação da sucção. (c) representação da ejeção e formação de vórtices. .... | 20 |
| Figura 2.2 – Esquema da geometria e dimensões de atuador de jatos sintéticos. ....  | 21 |
| Figura 2.3 – Métodos de produção de jatos sintéticos.....   | 21 |
| Figura 2.4 – Verificação de jato sintético com velocimetria por imagem de partículas (PIV).22   |    |
| Figura 2.5 – Funcionamento da ejeção e sucção de jato em um canal. ....   | 23 |
| Figura 2.6 – Jato sintético a partir de orifício retangular.....  | 24 |
| Figura 2.7 – Comparação de vorticidades do jato em diversas condições de sinal.....   | 25 |
| Figura 2.8 – Detalhamento do sistema de geração de jatos utilizado por Woyciekoski (2013).....  | 27 |
| Figura 2.9 – Sistema experimental elaborado para estudo de jatos sintéticos.....  | 28 |
| Figura 2.10 – Variação do número de Nusselt médio pela distância axial ( $Lx$ ). ....   | 29 |
| Figura 2.11 – Coeficiente médio de transferência de calor para diferentes frequências. ....   | 30 |
| Figura 2.12 – Desenho esquemático da geometria do canal de escoamento simulado. ....  | 31 |
| Figura 2.13 – Configuração da montagem experimental com fluxo cruzado. ....   | 31 |
| Figura 2.14 – Coeficientes de transferência de calor para as diferentes configurações de fluxo. (a) incidência direta. (b) fluxo cruzado. (c) fluxo combinado.....                    | 32 |
| Figura 3.1 – Transferência de calor por convecção.....  | 34 |
| Figura 3.2 – Transferência de calor por convecção (a) convecção forçada. (b) convecção natural. ....  | 35 |
| Figura 3.3 – Transferência de calor por convecção.....  | 36 |
| Figura 4.1 – Projeto da bancada experimental criado no software SolidWorks.....   | 39 |
| Figura 4.2 – Perspectiva em corte do projeto da bancada experimental. ....  | 40 |
| Figura 4.3 – Atuador de jatos sintéticos. ....  | 41 |
| Figura 4.4 – Montagem do elemento de aquecimento e formação do duto de escoamento na bancada experimental. ....   | 42 |
| Figura 4.5 – Bancada experimental desenvolvida. ....  | 43 |
| Figura 4.6 – Elemento de aquecimento com resistor cerâmico e sensores de temperatura.....   | 44 |
| Figura 4.7 – Elemento de aquecimento acoplado à bancada. ....   | 44 |
| Figura 4.8 – Aparato de instrumentos para medição e controle. ....  | 45 |
| Figura 4.9 – Detalhamento do sensor de temperatura LM35. ....   | 47 |
| Figura 4.10 – Detalhamento da plataforma Arduino.....   | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.11 – Circuitos eletrônicos montados em matriz de contatos.....   | 49 |
| Figura 4.12 – Fontes de alimentação para os circuitos eletrônicos de controle e potência.....   | 50 |
| Figura 4.13 – Circuito de medição de temperatura da bancada experimental.....   | 51 |
| Figura 4.14 – Circuito de indicação e armazenamento de dados da bancada experimental.....   | 52 |
| Figura 4.15 – Circuito eletrônico de potência e controle da bancada experimental.....   | 53 |
| Figura 4.16 – Diagrama em blocos do controle PWM implementado.....  | 54 |
| Figura 4.17 – Progressão da temperatura do elemento de aquecimento em modo PWM.....   | 54 |
| Figura 5.1 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 5 <i>Wrms</i> .....                              | 58 |
| Figura 5.2 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 10 <i>Wrms</i> .....                             | 58 |
| Figura 5.3 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 15 <i>Wrms</i> .....                             | 59 |
| Figura 5.4 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 20 <i>Wrms</i> .....                             | 59 |
| Figura 5.5 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 25 <i>Wrms</i> .....                             | 60 |
| Figura 5.6 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de 30 <i>Wrms</i> .....                             | 60 |
| Figura 5.7 – Relação entre os números de Reynolds e Strouhal do jato ao longo do duto de escoamento, a diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato em função da frequência, para o alto-falante desenvolvendo 20 <i>Wrms</i> . .... | 61 |
| Figura 5.8 – Temperatura mínima atingida para uma potência de aquecimento de 5 W de acordo com a frequência e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.....   | 63 |
| Figura 5.9 – Variação do número de Nusselt em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato. ....  | 65 |
| Figura 5.10 – Variação do coeficiente de convecção em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato.....   | 66 |
| Figura 5.11 – Temperatura mínima atingida ao ligar o jato, de acordo com a frequência e posição do elemento de aquecimento, a partir de uma temperatura inicial de 80 °C.....   | 67 |
| Figura 5.12 – Potência necessária para manter o elemento de aquecimento a 80 °C de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato. ....   | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.13 – Número de Nusselt em relação à frequência de oscilação, para temperatura constante no elemento de aquecimento em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato. ....                  | 70 |
| Figura 5.14 – Gráfico do coeficiente de convecção para temperatura constante no elemento de aquecimento em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato. .... | 70 |
| Figura 5.15 – <i>Coolers</i> utilizados em comparação ao jato sintético, com adaptadores para o duto da bancada experimental. ....  | 73 |
| Figura 5.16 – <i>Cooler</i> de 53 mm acoplado ao duto da bancada experimental.....  | 73 |
| Figura 5.17 – Variação da velocidade do ar gerado pelos <i>coolers</i> ao longo do canal.....   | 74 |
| Figura 5.18 – Temperatura mínima atingida no elemento de aquecimento, por cada <i>coolers</i> convencionais alimentado à sua tensão nominal. ....   | 75 |
| Figura 5.19 – Potência necessária para manter o elemento de aquecimento a 80°C com <i>coolers</i> convencionais alimentado à sua tensão nominal. ....   | 76 |
| Figura 5.20 – Indicação do local onde foi disposto o anemômetro de fio quente.....  | 77 |
| Figura 5.21 – Perfil de escoamento do fluido gerado por jato sintético a 60 Hz e 20 <b><i>Wrms</i></b> . 77   |    |
| Figura 5.22 – Perfil de escoamento do fluido gerado por <i>cooler</i> convencional de 53 mm alimentado a sua tensão nominal. ....   | 78 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 5.1 – Valores de número de Reynolds para configuração de escoamento de fluido do jato com alto falante na potência de 20 <i>Wrms</i> . .....  | 61 |
| Tabela 5.2 – Valores de número de Strouhal para configuração de escoamento de fluido do jato com alto-falante na potência de 20 <i>Wrms</i> . .....  | 62 |
| Tabela 5.3 – Valores do coeficiente de transferência de calor ( <i>h</i> ), em W/(m <sup>2</sup> .K), para 5 W de aquecimento de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato. ....  | 64 |
| Tabela 5.4 – Valores de número de Nusselt para 5 W de aquecimento de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.....   | 64 |
| Tabela 5.5 – Valores do coeficiente de transferência de calor por convecção ( <i>h</i> ), em W/(m <sup>2</sup> .K), a temperatura constante e monitorando a potência no elemento de aquecimento, de acordo com a frequência do jato e posição em relação ao orifício de saída do jato..... | 68 |
| Tabela 5.6 – Valores do número de Nusselt para temperatura constante no elemento de aquecimento e monitorando a potência. ....   | 69 |
| Tabela 5.7 – Dados técnicos dos <i>coolers</i> utilizados na comparação. ....  | 72 |
| Tabela 5.8 – Valores de número de Reynolds para escoamento do fluido com a configurações de <i>coolers</i> tradicionais utilizados na comparação. ....   | 74 |
| Tabela 5.9 – Valores de vazão mássica (em kg/s) para escoamento prroduzido pelo jato sintético a 60 Hz e 20 <i>Wrms</i> e <i>coolers</i> tradicionais. ....  | 78 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>16</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....  | 17        |
| 1.1.1 Objetivos Específicos .....  | 17        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....  | 18        |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....  | 18        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>20</b> |
| 2.1 ATUADORES DE JATOS SINTÉTICOS .....  | 20        |
| 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE JATOS SINTÉTICOS .....   | 24        |
| 2.3 DESEMPENHO DE JATOS SINTÉTICOS EM RESFRIAMENTO .....   | 25        |
| 2.3.1 Jatos Sintéticos em Configuração de Impactação .....   | 27        |
| 2.3.2 Jatos Sintéticos em Configuração Tangencial .....  | 30        |
| <b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>  | <b>34</b> |
| 3.1 CONVECÇÃO .....  | 34        |
| 3.2 NÚMERO DE REYNOLDS E STROUHAL .....  | 36        |
| <b>4 ESTUDO EXPERIMENTAL - METODOLOGIA .....</b>   | <b>39</b> |
| 4.1 ELABORAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....  | 39        |
| 4.2 ELEMENTO DE AQUECIMENTO .....  | 43        |
| 4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....   | 45        |
| 4.3.1 Circuito de Controle .....   | 50        |
| 4.3.2 Circuito de Potência.....  | 52        |
| 4.4 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM FUNCIONAMENTO PWM.....   | 53        |
| <b>5 ESTUDO EXPERIMENTAL .....</b>   | <b>56</b> |
| 5.1 VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DO FLUIDO .....  | 57        |
| 5.2 RESFRIAMENTO DE ELEMENTO AQUECEDOR MANTIDO A POTÊNCIA<br>CONSTANTE E MONITORANDO A TEMPERATURA .....           | 62        |
| 5.2.1 Procedimento de Teste.....   | 62        |
| 5.2.2 Resultados de Resfriamento .....   | 64        |
| 5.3 RESFRIAMENTO DE ELEMENTO AQUECEDOR MANTIDO A TEMPERATURA<br>CONSTANTE E MONITORANDO A POTÊNCIA DISSIPADA ..... | 66        |
| 5.3.1 Procedimentos de Teste .....   | 66        |
| 5.3.2 Resultados de Resfriamento .....   | 68        |
| 5.4 COMPARAÇÕES ENTRE RESFRIAMENTO DE JATO SINTÉTICO COM <i>COOLER</i><br>CONVENCIONAL .....                       | 71        |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4.1    | Velocidades do fluido com utilização de <i>coolers</i> convencionais .....   | 74         |
| 5.4.2    | Procedimentos de teste com <i>cooler</i> convencional .....  | 75         |
| 5.4.3    | Verificação da vazão mássica no duto de escoamento .....   | 76         |
| 5.4.4    | Análise comparativa do jato sintético e <i>coolers</i> convencionais .....   | 79         |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>81</b>  |
| <b>7</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>  | <b>83</b>  |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>84</b>  |
|          | <b>APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO .....</b>  | <b>87</b>  |
|          | <b>APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ELEMENTO DE AQUECIMENTO .....</b>          | <b>88</b>  |
|          | <b>APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE INDICAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS DA BANCADA EXPERIMENTAL .....</b> | <b>89</b>  |
|          | <b>APÊNDICE D – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE POTÊNCIA E CONTROLE DA BANCADA EXPERIMENTAL .....</b>                | <b>90</b>  |
|          | <b>APÊNDICE E – PROGRAMAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO .....</b>  | <b>91</b>  |
|          | <b>ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE .....</b>   | <b>104</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Um resfriamento adequado, extremamente necessário quando se trata de dispositivos eletrônicos, é o que mantém os circuitos e sistemas eletrônicos funcionando perfeitamente. Esta demanda de resfriamento de dispositivos eletrônicos se deve principalmente à evolução constante e miniaturização que aumentam a potência e velocidades de processamento, e conseqüentemente também aumentam a necessidade de dissipação de calor. Esta maior relação de dissipação por área, mais presente em componentes eletrônicos miniaturizados, dificulta o controle de temperatura para funcionamento adequado de componentes eletrônicos, que para um chip é abaixo de 85 °C (Bhowmik *et al.*, 2005) ou abaixo da temperatura máxima fornecida pelo fabricante (Mathews e Balaji, 2006). Divulgado em 2008 e revisto em 2011, o estudo da “International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)”, mostrado em gráfico na Fig. 1.1, prevê crescimento exponencial de componentes eletrônicos dentro de um único encapsulamento e com isso, conforme Chandratilleke *et al.* (2010), fica evidente a necessidade de pesquisar novas técnicas com maior eficiência na transferência de calor.

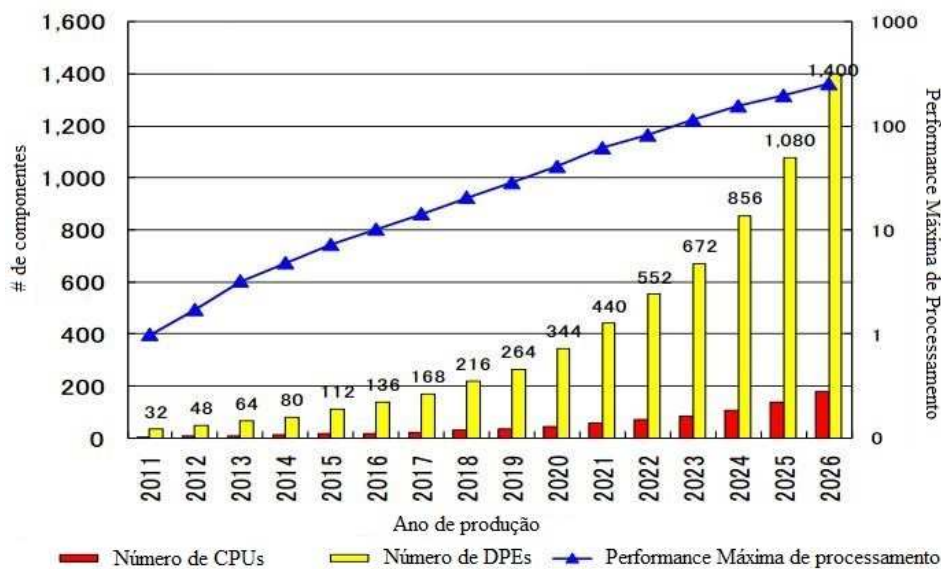


Figura 1.1 – Previsão da demanda eletrônica futura e da complexidade dos projetos térmicos.  
Fonte: Adaptado de ITRS (2011).

Se o avanço rápido e constante da eletrônica proporciona rapidez no processamento de informações, temos como resultado o efeito de sobrecarga térmica que exige a constante necessidade de encontrar alternativas de resfriamento mais eficientes para controle da

temperatura de funcionamento. O excesso de temperatura é considerado um dos principais motivos de avaria em sistemas eletrônicos.

De acordo com Xu *et al.* (1998), para a escolha do fluido de arrefecimento a ser utilizado em sistemas eletrônicos, sempre que possível deve-se utilizar o ar devido sua economia e facilidade de manipulação em pequenos espaços, mas é reconhecida a melhor eficiência da refrigeração líquida para componentes eletrônicos de maior potência. Ainda assim, o sistema de resfriamento de ar em convecção forçada é a que possibilita maior confiabilidade com menor custo para arrefecimento eletrônico. Mas como citado por Chaudhari *et al.* (2010a, 2010b), o método convencional de utilização de ventilação forçada exige ventiladores de grande vazão para gerar o fluxo de ar necessário para circular pelos dutos e aletas do dissipador de calor. Considerando este obstáculo com a utilização de ventilação forçada, a utilização de jatos sintéticos apresenta um diferencial superior devido ao ganho no aumento da convecção com o incremento da turbulência no escoamento sobre a superfície a ser resfriada.

Jatos sintéticos, método incipiente no resfriamento de dispositivos eletrônicos, são gerados pela oscilação delimitada de uma membrana que ocasiona a sucção e ejeção de um fluido através de uma pequena cavidade. Conforme Chaudhari *et al.* (2010a), devido à natureza oscilatória do jato sintético, o resfriamento do fluido é mais elevado se comparado a de um jato contínuo, o que ajuda em um resfriamento eficaz.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo verificar o resfriamento de um elemento de aquecimento utilizando um jato sintético alinhado de forma que o escoamento do jato ocorra tangencialmente à superfície aquecida, neste trabalho mencionada como elemento de aquecimento.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Construir um protótipo experimental condizente com trabalhos de simulação numérica e experimental anteriormente desenvolvidos;
- Verificar parâmetros ideais de funcionamento do experimento, considerando os dados obtidos em trabalhos anteriores e analisando possíveis alterações e melhorias;
- Analisar eventuais alterações que possam resultar em melhor rendimento no resfriamento eletrônico por jatos sintéticos;

- Comparar resultados de resfriamento eletrônico por jatos sintéticos em relação a métodos tradicionais de resfriamento.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

São necessários novos e eficazes métodos de arrefecimento de dispositivos eletrônicos devido aos desenvolvimentos tecnológicos na área eletrônica. Além do estudo de um método eficiente de arrefecimento, há a necessidade de atender às restrições de espaço e apresentar confiabilidade na transferência de calor.

Os jatos sintéticos se apresentam como uma boa alternativa aos métodos tradicionais de arrefecimento, pois funcionam com o próprio fluido ambiente e propiciam um aumento na troca térmica. Estudos de jatos sintéticos são incipientes, mas possuem aplicações na dissipação de calor em dispositivos eletrônicos, como também na indústria, como secagem industrial de celulose e têxtil, como também têmpera e recozimento nos processos de fabricação de vidros e metais.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica, descrição dos procedimentos e atividades executadas na definição, projeto e montagem do protótipo, o estudo experimental e os resultados atingidos.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica aborda as definições e estudos já realizados referente a jatos sintéticos, formas de geração e caracterização dos jatos sintéticos, comparação com outros métodos de resfriamento e análise do protótipo desenvolvido para este experimento.

No capítulo 3 é desenvolvida a fundamentação teórica, que analisa as características de convecção envolvidas em jatos sintéticos e trocadores de calor.

No capítulo 4 é abordada a metodologia aplicada no trabalho desenvolvido, onde é apresentado a elaboração da bancada experimental, o sistema de aquisição de dados com o aparato de equipamentos utilizados e calibrações necessárias.

No capítulo 5 é desenvolvida a apresentação do estudo experimental realizado, com enfoque nos modos de arrefecimento utilizados e comparação entre resfriamento por jatos sintéticos e com *cooler* convencional.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais, conclusão e propostas de continuidade deste trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é destinado ao relato dos conceitos envolvidos no trabalho, com análise dos estudos já desenvolvidos até o momento em relação aos jatos sintéticos.

### 2.1 ATUADORES DE JATOS SINTÉTICOS

Os atuadores de jatos sintéticos são dispositivos formados por uma cavidade construída de paredes rígidas contendo um orifício e uma membrana flexível que oscila em determinada frequência, e que com este movimento, forma os jatos sintéticos através da sucção e ejeção periódica de fluido através de um orifício (MAHALINGAM *et al.*, 2007). Este procedimento é mostrado de maneira esquemática na Fig. 2.1, onde o jato resultante é direcionado na direção vertical, para baixo. Ao contrário de jatos contínuos, os jatos sintéticos funcionam sem injeção de massa líquida. Conforme revisão de Chaudhari *et al.* (2010b), o jato sintético é gerado a partir de um fluido circundante e a oscilação da velocidade ao longo do seu eixo associada a geração de um anel de vórtices.

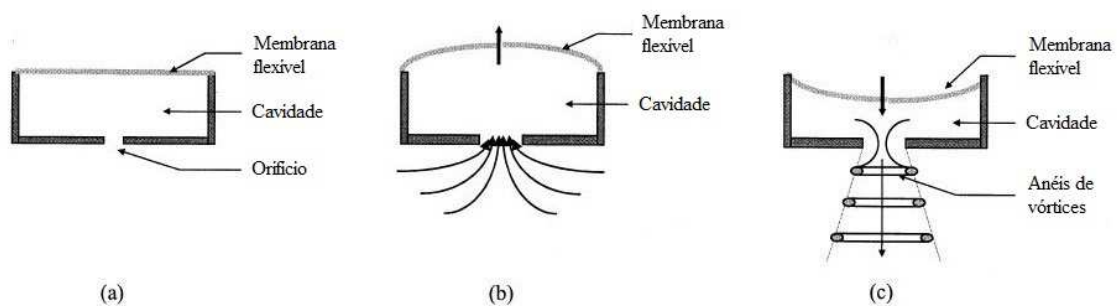


Figura 2.1 – Diagrama de operação de jatos sintéticos. (a) Componentes básicos do dispositivos. (b) representação da sucção. (c) representação da ejeção e formação de vórtices.

Fonte: Adaptado de Glezer *et al.* (2003).

Em termos de desempenho, Smith e Swift (2003), realizaram uma comparação entre jatos sintéticos e jatos contínuos, chegando à conclusão que, na região de transição, os jatos sintéticos se assemelham com os jatos contínuos e contém perfis de velocidade idênticos. Eles ressaltam que a diferenciação entre os jatos se dá na região inicial, quando os jatos sintéticos são caracterizados pelo arraste do fluido por pares de vórtices. Com isso, jatos sintéticos apresentam maior crescimento se comparados a jatos contínuos, seja em termos de largura de fluxo quanto em volume do jato.

A forma detalhada e a geometria correspondente de um atuador de jatos sintéticos, incluindo dimensões, componentes e termos envolvidos é visto na Fig. 2.2, onde o jato é voltado na direção vertical, para cima. Na geometria do dispositivo,  $D_h$  é o diâmetro hidráulico do orifício,  $D$  é a largura da cavidade, e  $H_c$  é a altura da cavidade. A direção  $x$  é a direção axial de deslocamento dos anéis de vórtices e a direção  $z$  é a direção transversal de ejeção do jato.

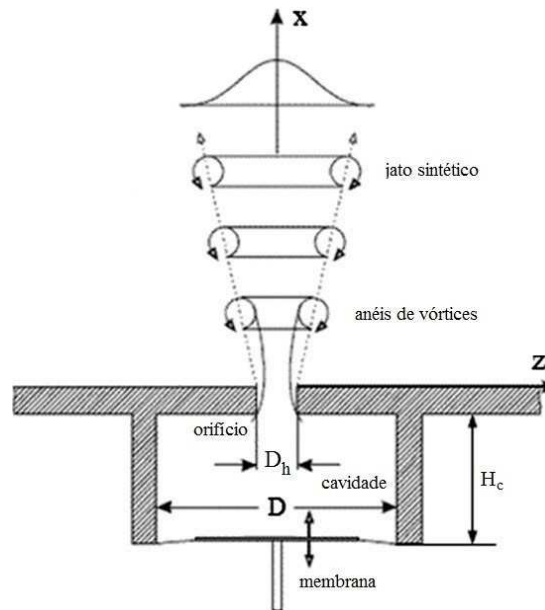


Figura 2.2 – Esquema da geometria e dimensões de atuador de jatos sintéticos.  
Fonte: Adaptado de Xiao-Ming e Jing-Zhou (2013).

O deslocamento da membrana pode ser realizado por diversas técnicas, como os meios piezoelétrico, magnético ou mecânico, com amplitude suficiente para induzir o fluxo de separação no orifício. Isso faz com que ocorra uma mudança no volume da cavidade, e o fluido comprimido seja projetado para o ambiente exterior através do orifício. Alguns dos processos de formação de jatos sintéticos são mostrados na Fig. 2.3.

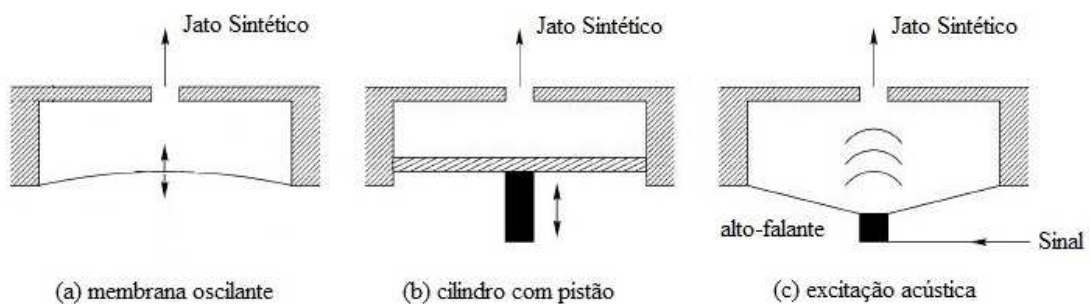


Figura 2.3 – Métodos de produção de jatos sintéticos.  
Fonte: Adaptado de Mallinson *et al.* (2004).

Conforme Chaudhari *et al.* (2010a), o jato sintético não requer fonte específica de fluido, pois o mesmo fluido ambiente pode ser utilizado na sucção e expulsão do jato sintético. Com isso não há a necessidade de suprimento extra de fluido ou instalações complexas para suprir o jato sintético. Esta característica particular de funcionamento do jato sintético, de acordo com WANG *et al.* (2010), é denominada “zero-mass-flux” ou “zero-net-mass-flux” (ZNMF). De acordo com Smith e Glezer (1998), o jato sintético é um fluxo formado diretamente a partir do fluido no sistema em que está incorporado.

De acordo com Mahalingam *et al.* (2007), que utilizou a velocimetria por imagem de partículas (PIV) para verificar a geração de jato sintético mostrado na Fig. (2.4 (a) – (c)), a ejeção ocorre com a expulsão do fluido da cavidade e a criação de um par de vórtices no meio externo. A característica turbulenta dos jatos sintéticos é devido a esta vorticidade. Se a expulsão do fluido para o meio externo for contínua, o jato formado será constante. Com a oscilação periódica da membrana, há formação periódica de vorticidade, e isso forma a estrutura do jato sintético. A Fig. (2.4 (c) - (d)) apresenta o deslocamento da vorticidade do jato em relação ao orifício de saída, o que evita a ocorrência de re-arrastamento ou sucção do fluido expelido quando a membrana inverte de direção de oscilação. Os pares de vórtices formados na saída do orifício a partir da ejeção, conforme Smith e Glezer (1998), geram instabilidade no escoamento do fluido expelido devido interações subharmônicas e logo após passa por uma transição e conseqüentemente a um escoamento turbulento. Mais a jusante, ocorre a desaceleração do jato devido ao fluido circundante.

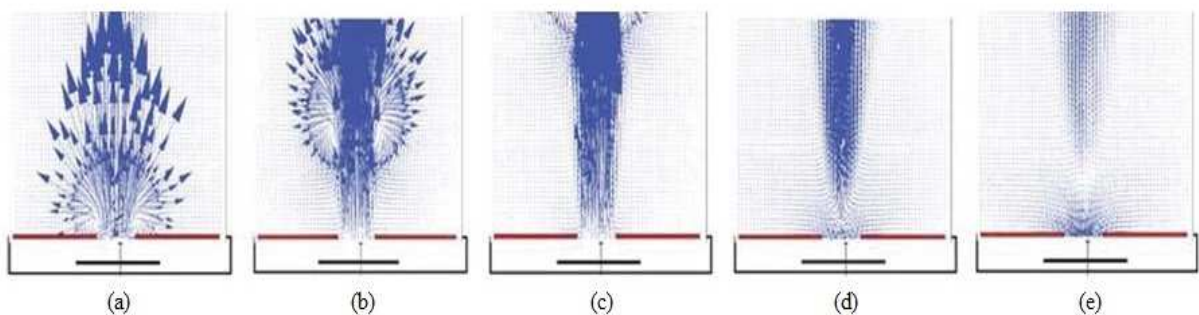


Figura 2.4 – Verificação de jato sintético com velocimetria por imagem de partículas (PIV).  
Fonte: Mahalingam *et al.* (2007).

O jato sintético, conforme Glezer e Amitay (2002), também pode ser formado pela oscilação de pressão de um campo acústico, ou seja, a membrana osciladora de um alto-falante. Isso é possível devido á compressibilidade do ar, que ao atingir oscilações de pressão suficientemente altas, possibilita um efeito de ressonância acústica e a expulsão de vórtices



através do orifício. É importante ressaltar que a ressonância precisa produzir vórtices com grandeza suficiente para superar a resistência imposta pelas dimensões reduzidas do orifício e as forças relacionadas ao curso de sucção. Também pode ocorrer oscilação acústica sem a presença de jatos sintéticos. McGuinn *et al.* (2013) citam este fenômeno, conhecido como “streaming” acústico, descrito em estudo realizado em meados de 1950. De acordo com Smith e Glezer (1998), este fenômeno é resultado da dissipação de energia acústica ou a atenuação da transmissão do som propagado.

O enfoque deste trabalho experimental desenvolvido é verificar a capacidade de arrefecimento de um jato sintético escoando tangencialmente sobre a superfície de um elemento de aquecimento disposto em um canal horizontal. Na Fig. 2.5 é possível conceber melhor geometria proposta para este estudo, onde os jatos sintéticos geram um escoamento oscilante e rente às paredes internas do canal de modo a proporcionar o arrefecimento sobre toda extensão da superfície aquecida. A presença dos jatos sintéticos induz a formação de um escoamento oscilante dentro do próprio canal com velocidade média positiva. Assim, esta geometria proposta é semelhante ao resfriamento de aletas onde o escoamento médio induzido por um *cooler* fornece a convecção forçada.

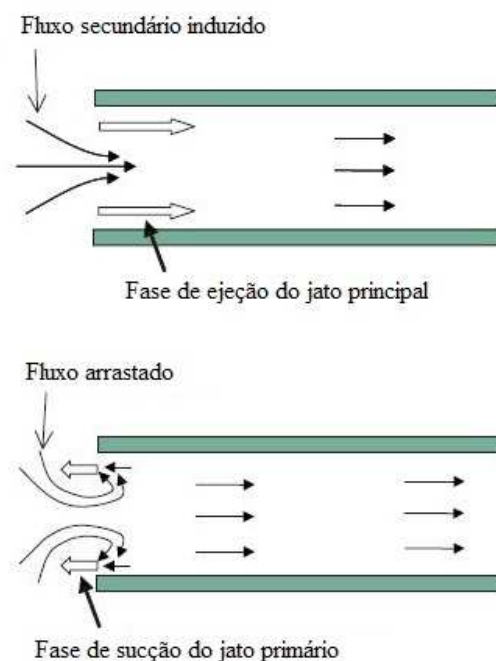


Figura 2.5 – Funcionamento da ejeção e sucção de jato em um canal.  
Fonte: Mahalingam *et al.* (2007).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE JATOS SINTÉTICOS

Em estudo experimental, para efeito de visualização, Smith e Glezer (1998) realizaram o aquecimento do ar no interior da cavidade do atuador utilizando um aquecedor de película montado nas paredes da cavidade. A imagem mostrada na Fig. 2.6, gravada por uma câmera de alta velocidade com tempo de exposição de  $100 \mu\text{s}$ , apresenta um par de vórtices formados junto ao orifício e um jato turbulento mais distante à ejeção. Neste experimento foram utilizados 1140 Hz para a frequência de oscilação e utilizando orifício retangular com dimensões 0,5 mm por 75 mm, sendo que o número de Reynolds ficou entre 383 e 18124.

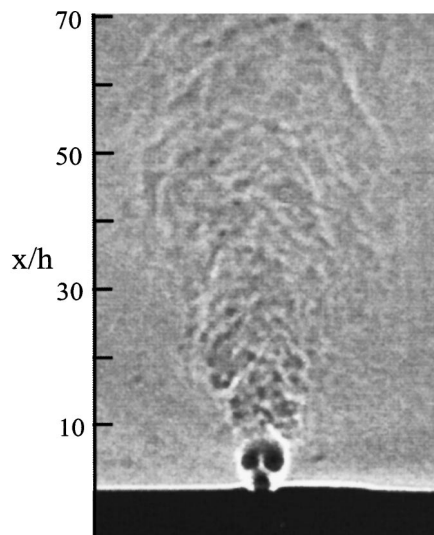


Figura 2.6 – Jato sintético a partir de orifício retangular.  
Fonte: Smith e Glezer (1998).

Conforme citado por Smith e Glezer (1998), quando o fluido é ejetado para fora do orifício, a pressão estática média é positiva se comparado com o fluido externo à cavidade. Quando ocorre a sucção, a pressão estática média próximo à saída do orifício é geralmente menor que a do ambiente, e esta tendência de reversão do campo de pressão propicia a formação de um ponto de estagnação no escoamento do fluido na garganta do orifício.

Em estudo realizado por Mallinson *et al.* (2003) foi utilizada a dinâmica computacional dos fluidos (CFD) com atuador de jatos sintéticos considerado de microescala, com orifício retangular de 0,2 mm por 0,165 mm e cavidade com largura de 3,68 mm e altura de 0,135 mm. Isto representa aproximadamente um décimo das dimensões de um atuador de escala macro utilizado em experimentos anteriores. Os resultados verificados são mostrados na Fig. 2.7 em nove diferentes casos, utilizando exatamente a mesma geometria do orifício e verificadas no

mesmo instante de tempo. Conforme cada coluna de imagens, há uma maior difusão da vorticidade do fluxo externo a medida que se aumenta a amplitude e frequência de sinal em forma de onda senoidal aplicadas à membrana, enquanto que os fluxos na cavidade e orifício se comportam de maneira semelhante a atuadores em escala macro. O estudo também determinou que no plano de saída do atuador, a velocidade do escoamento varia linearmente com o produto da amplitude e frequência do sinal aplicados à membrana, que são relacionados diretamente com o deslocamento e frequência da membrana

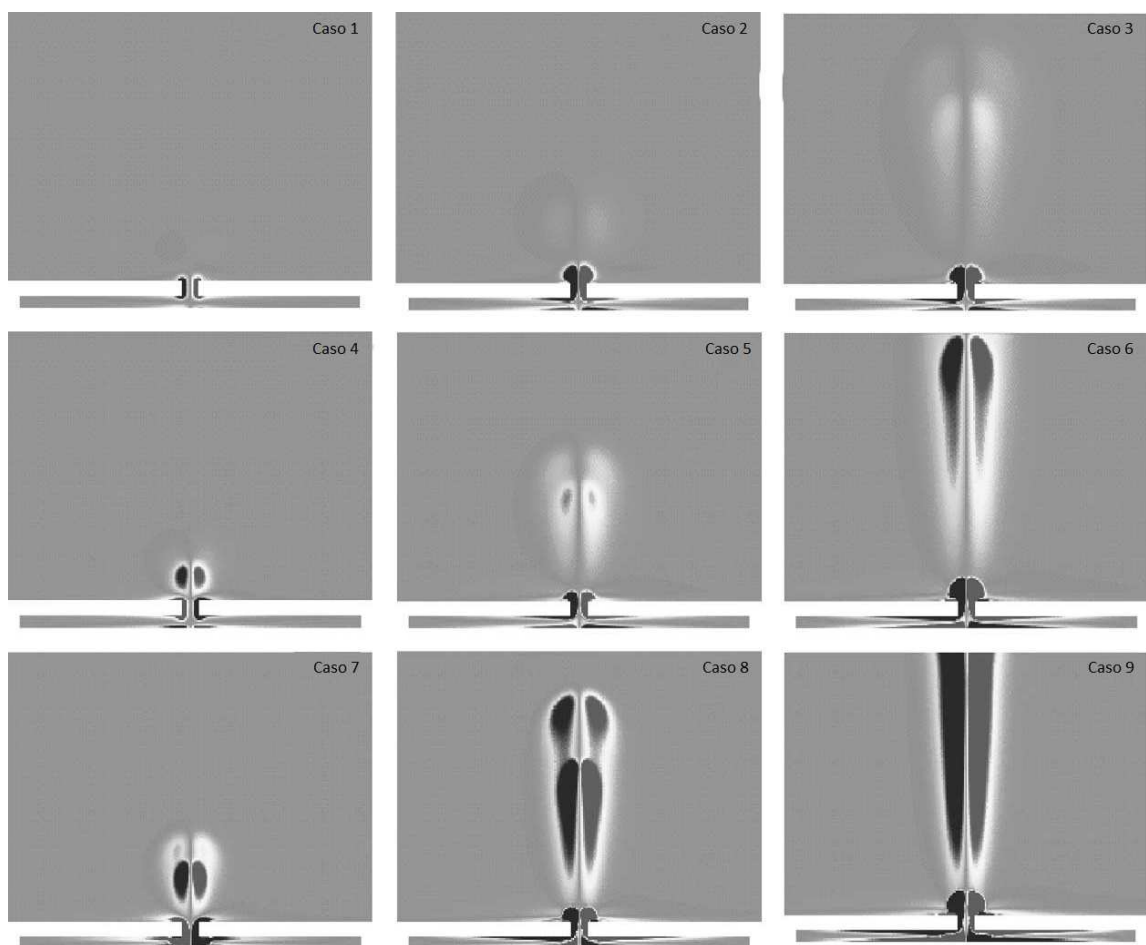


Figura 2.7 – Comparação de vorticidades do jato em diversas condições de sinal.  
Fonte: Mallinson *et al.* (2003).

### 2.3 DESEMPENHO DE JATOS SINTÉTICOS EM RESFRIAMENTO

Conforme McGuinn *et al.* (2008), que consideram outros estudos na elaboração de seu experimento, jatos sintéticos podem ser utilizados principalmente em arrefecimento de

dispositivos eletrônicos ou em casos onde se exigem elevadas taxas de dissipação de calor. A utilização adequada de um sistema de jatos sintéticos requer conhecimento dos parâmetros envolvidos que afetam a dissipação de calor. Os parâmetros que interferem na taxa de transferência de calor de um jato sintético são variados e complexos, e como exemplo, podem ser citados o formato e dimensões do orifício por onde escoar o fluido, a frequência e o curso de oscilação da membrana, que interferem diretamente nos números de Nusselt (Nu) e Reynolds (Re).

Para exemplificar, no experimento desenvolvido por Pavlova e Amitay (2006), foi verificada a eficiência no arrefecimento de uma superfície com fluxo de calor constante, utilizando jatos sintéticos e contínuos visando uma comparação de desempenho entre eles. No arrefecimento por jatos sintéticos, com frequência de 420 Hz, foram obtidos melhores resultados de arrefecimento em distâncias axiais menores, e na frequência de 1200 Hz foi observado arrefecimento mais efetivo em distâncias axiais maiores. Verificaram também que os jatos sintéticos apresentam maior eficiência que jatos contínuos para o mesmo número de Reynolds (Re), atribuindo isso aos vórtices criados pelos jatos sintéticos que intensificam a remoção de calor na superfície que está sendo arrefecida.

Chaudhari *et al.* (2010a) realizaram experimento para verificar o efeito do formato do orifício na dissipação de calor de uma superfície aquecida; os formatos utilizados foram o quadrado, circular e retangular. O diâmetro hidráulico ( $D_h$ ) médio foi de 3,8 mm a 8 mm e o coeficiente de transferência de calor é obtido em função da distância entre o orifício de saída do jato e a superfície aquecida. Com frequência de oscilação da membrana entre 55 Hz e 250 Hz, o número de Reynolds ficou na faixa entre 950 e 4000 baseado na velocidade média e a distância axial varia entre 1 e 25 diâmetros hidráulicos. Como resultados, verificaram que há grande semelhança nos resultados com a utilização de orifícios quadrados e circulares, enquanto o orifício retangular se difere deles. Utilizando orifícios quadrado e circular, são obtidos melhores resultados em maiores distâncias axiais, enquanto que com a utilização de orifício retangular se percebe melhor arrefecimento a distâncias axiais menores e por este motivo se coloca como melhor opção para arrefecimento de superfícies onde há restrição de espaço.

Relacionando a taxa de transferência de calor com a frequência de oscilação da membrana utilizada na geração do jato sintético, o trabalho de Chaudhari *et al.* (2009) relata experimentalmente essa relação com o efeito da frequência de excitação da membrana de jatos sintéticos no arrefecimento de superfície aquecida, utilizando diferentes distâncias e vários formatos de orifícios para expulsão do jato. As frequências de ressonância foram identificadas como a frequência da membrana e a frequência de Helmholtz, sendo a ressonância de

Helmholtz conhecida como o fenômeno que ocorre quando o ar passa por uma cavidade e, devido a isso, ressoa, e tem como exemplo o som gerado ao soprar o gargalo de uma garrafa vazia. No estudo de Chaudhari *et al.* (2009), a frequência da membrana foi considerada a mais importante por corresponder à maior velocidade de jato sintético e com menor consumo de energia. Entretanto, a frequência da membrana depende de aspectos materiais e é independente dos parâmetros geométricos examinados no estudo.

### 2.3.1 Jatos Sintéticos em Configuração de Impactação

A montagem experimental realizada por Woyciekoski (2013) consiste em uma bancada de gerador de jato sintético com diferentes dimensões do orifício retangular. O gerador de jatos sintéticos criado por Woyciekoski (2013), consiste em um alto-falante de 76 mm de diâmetro, 8  $\Omega$  de impedância e 30 W de potência acoplado a placas confeccionadas em acrílico cristal e fixadas por parafusos de maneira sobreposta a fim de formar a cavidade de armazenamento do fluido e o orifício do jato sintético. A Fig. 2.8 apresenta o detalhamento da montagem do sistema de geração de jatos criado por Woyciekoski (2013), com indicação das principais partes e componentes. As placas utilizadas foram confeccionadas em acrílico cristal, quadradas, com aresta de 200 mm. A placa superior, com espessura entre 2 e 8 mm, possui um orifício centralizado com 76 mm de diâmetro onde é formada a cavidade do gerador de jatos ao ser acoplado ao alto-falante. A placa inferior possui 3 mm de espessura e é acoplada por parafusos à placa superior, possuindo no seu centro o orifício retangular para expulsão do jato.



Figura 2.8 – Detalhamento do sistema de geração de jatos utilizado por Woyciekoski (2013).  
Fonte: Adaptado de Woyciekoski (2013).

Conforme Woyciekoski (2013), para testar o dispositivo gerador de jatos sintéticos foi necessário fixá-lo a uma bancada móvel onde é possível ajustar a distância entre o jato e a

superfície aquecida. No experimento, foi utilizado como elemento de aquecimento uma placa de cobre quadrada de lateral 40 mm e espessura 0,5 mm e um resistor de 40  $\Omega$  de resistência, com aquecimento controlado por termostato. Este conjunto de aquecimento foi montado na base da bancada para receber o impacto do jato sintético criado pelo sistema de geração de jato sintético montado no suporte móvel. A Fig. 2.9 apresenta este sistema elaborado e utilizado por Woyciekoski (2013).

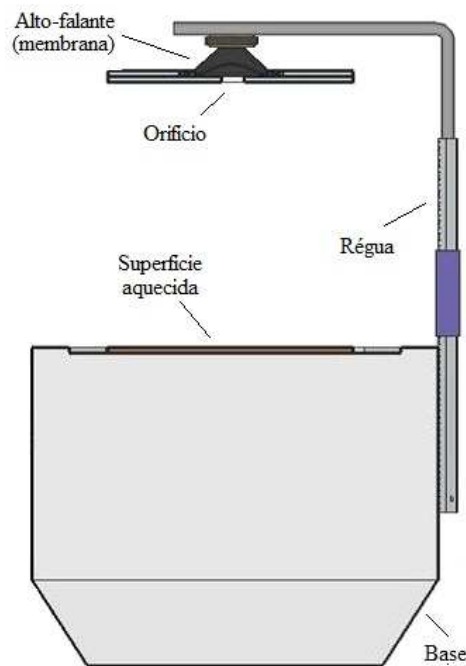


Figura 2.9 – Sistema experimental elaborado para estudo de jatos sintéticos.  
Fonte: Adaptado de Woyciekoski (2013).

No experimento, Woyciekoski (2013) obtém a temperatura média da placa aquecida através de sensores de temperatura LM35 fixados à placa de aquecimento e também no seu entorno. Os jatos ejetados verticalmente para baixo pelo sistema de geração colidem contra a placa aquecida posicionada na base da bancada. No experimento foram testadas diversas distâncias entre a saída do jato e a placa de aquecimento. Foi fornecida uma potência constante ao resistor da placa de aquecimento, que foi medida por um multímetro e uma frequência de excitação constante gerada por gerador de sinais aplicada ao alto-falante. A velocidade do jato foi verificada através de anemômetro portátil de fio quente.

Os dados obtidos nos diversos testes, através de várias configurações e parâmetros utilizados por Woyciekoski (2013) no experimento, foram comparados com estudos anteriormente realizados por pesquisadores e publicados em artigos científicos. Como exemplo

de comparação entre os estudos realizados, a Fig. 2.10 apresenta a variação do número de Nusselt médio ( $\overline{Nu}$ ) pela distância axial ( $L_x$ ) para as três configurações de orifício testadas, em comparação ao estudo realizado por Chaudhari *et al.* (2010c). As configurações 1, 2 e 3 utilizadas por Woyciekoski (2013) se referem às dimensões do orifício, com as dimensões 20 mm x 5 mm, 10 mm x 2,5 mm e 12 x 6 mm, respectivamente.

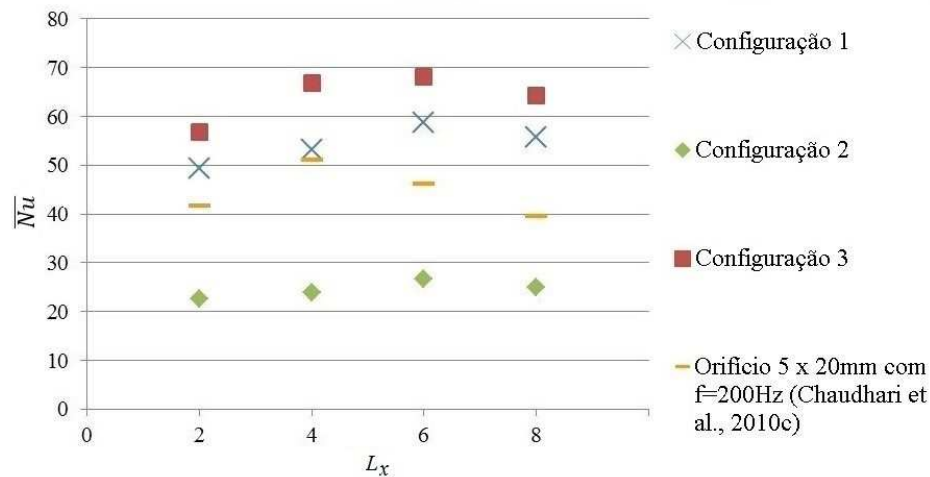


Figura 2.10 – Variação do número de Nusselt médio pela distância axial ( $L_x$ ).  
Fonte: Adaptado de Woyciekoski (2013).

Estudo experimental similar foi realizado por Bhapkar *et al.* (2013), que verificou a capacidade de transferência de calor de um jato sintético, observando o efeito das dimensões do orifício e parâmetros operacionais, como também o nível de ruído gerado. O objetivo foi definir as dimensões do orifício e a frequência de operação para obter simultaneamente a máxima velocidade do jato e baixo ruído de funcionamento. O estudo foi estendido para determinar o efeito de inclinação de impactação do jato sobre a placa aquecida. Como resultado, obtiveram que o coeficiente máximo de transferência de calor ocorre com impactação do jato diretamente sobre a placa aquecida independente do espaçamento entre eles.

Em outro estudo, Chaudhari *et al.* (2010c) utilizaram aparato experimental similar ao utilizado posteriormente por Woyciekoski (2013), onde verificou-se o comportamento do coeficiente médio de transferência de calor com a variação da distância axial entre o jato, disposto perpendicularmente, e a superfície aquecida a ser arrefecida. Dentre os diversos resultados obtidos no experimento, a Fig. 2.11 apresenta a variação do coeficiente médio de convecção com a distância axial para diferentes frequências de excitação da membrana e com as mesmas dimensões do orifício e cavidade.

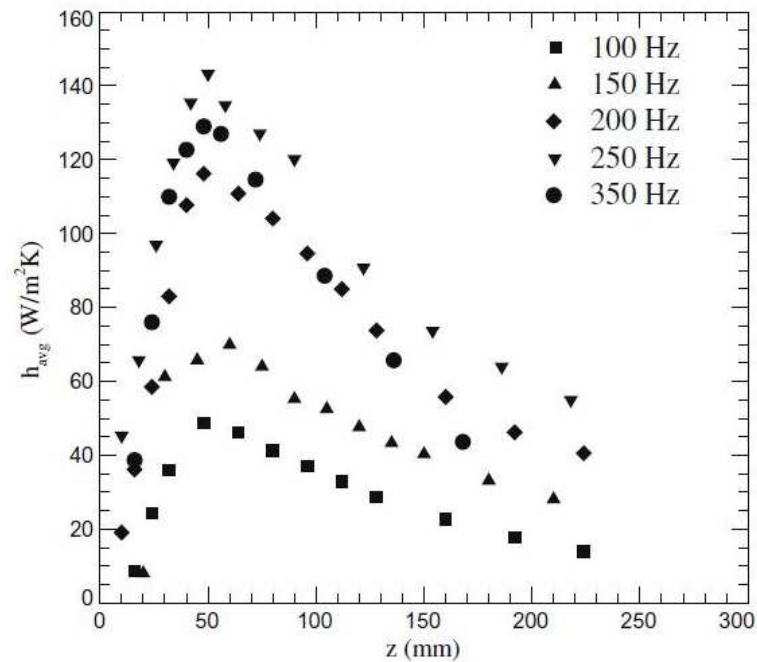


Figura 2.11 – Coeficiente médio de transferência de calor para diferentes frequências.  
Fonte: Chaudhari *et al.* (2010c).

Chaudhari *et al.* (2010c) verificou que o coeficiente médio de convecção é afetado pelas dimensões do orifício e posição da superfície aquecida. Este aumenta com a diminuição da espessura da placa do orifício e possui um ponto máximo quando a superfície aquecida é posicionada próxima ao orifício. Por outro lado, a profundidade da cavidade tem efeito desprezível sobre o coeficiente médio de convecção, mas seu máximo ocorre na frequência de ressonância da cavidade. Foi ressaltado que, para arrefecimento de dispositivos eletrônicos, os jatos sintéticos possuem desempenho comparável a jatos contínuos de impactação direta com baixo número de Reynolds, de até 4000.

### 2.3.2 Jatos Sintéticos em Configuração Tangencial

Na simulação computacional de arrefecimento de elemento de aquecimento através de jatos sintéticos, realizada por Munhoz (2012), foi utilizado o software ANSYS CFX para a criação de uma geometria 2-D na forma de um canal horizontal por onde escoo o fluido, conforme mostrado na Fig. 2.12. Para analisar o comportamento térmico, um elemento de aquecimento representando um chip de computador, foi colocado em duas posições distintas no canal horizontal, a distâncias  $15H_x$  e  $40H_x$  da origem do jato, denominados Sólido 1 e Sólido 2, onde  $H_x$  se refere à altura do duto de saída do atuador de jatos sintéticos.



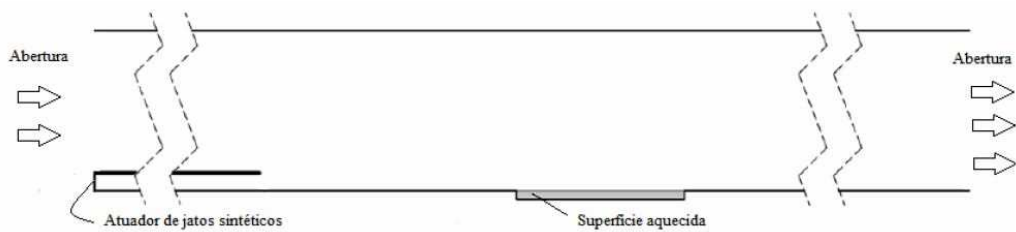


Figura 2.12 – Desenho esquemático da geometria do canal de escoamento simulado.  
Fonte: Munhoz (2012).

Neste caso os jatos sintéticos escoam paralelamente à superfície aquecida de modo a ter efeito semelhante ao escoamento convencional sobre uma aleta. Nesta configuração, a presença do jato sintético induz um escoamento médio ao longo do canal. De acordo com Munhoz (2012), foram obtidos com jatos sintéticos melhores números de Nusselt e coeficiente de convecção do que com um escoamento constante de vazão mássica idêntica ao escoamento induzido pelos jatos. Nas simulações realizadas, foram obtidos números de Nusselt de 42% a 122% maiores do que para um escoamento constante, e isso se deve em grande parte à elevada turbulência que ocorre no escoamento na região aquecida do canal, gerada pela maior vorticidade.

Em um estudo experimental, Chaudhari *et al.* (2010b), analisaram as características de transferência de calor utilizando jatos sintéticos de fluxo cruzado escoando em um duto retangular, com configuração de montagem conforme Fig. 2.13. O duto possui altura de 25 mm e largura variando de 110 mm a 330 mm e foi examinado o coeficiente de transferência de calor com efeito de confinamento. O número de Reynolds variou entre 950 e 4000.

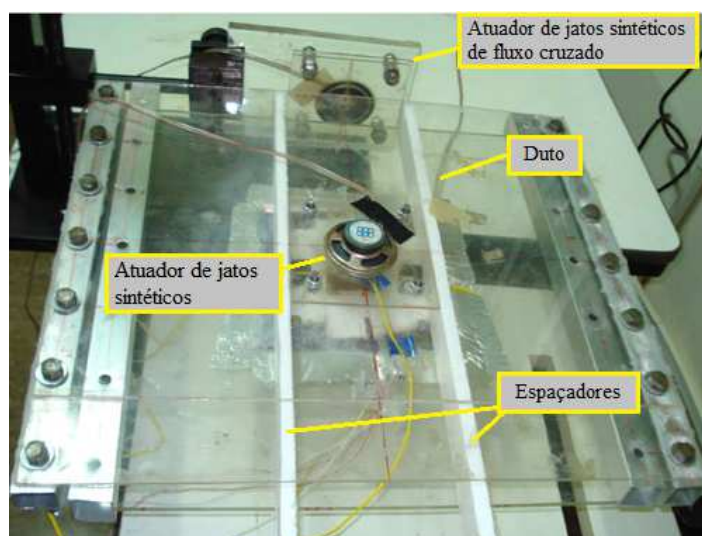


Figura 2.13 – Configuração da montagem experimental com fluxo cruzado.  
Fonte: Chaudhari *et al.* (2010b).

Para melhor entendimento do experimento realizado por Chaudhari *et al.* (2010b), a Fig. 2.14 apresenta diferentes combinações de arrefecimento analisadas no experimento. Utilizando elementos de aquecimento, confeccionados em cobre (Cu) fixados nas paredes superior e inferior do duto por onde escoa o jato sintético, foram verificados e informados os coeficientes de transferência de calor, para as diferentes configurações verificadas. No experimento de Chaudhari *et al.* (2010b), o fluxo combinado diminuiu o coeficiente médio de transferência de calor em relação ao jato sintético de impactação direta. A explicação provável para este resultado foi que o fluido já ejetado por um dos atuadores de jatos sintéticos seja succionado no ciclo seguinte, ocasionando na redução da capacidade de arrefecimento devido sua temperatura elevada. O efeito de confinamento também é verificado no procedimento experimental pela variação da largura do canal de escoamento do jato, e foi observado que para bom arrefecimento de dispositivos eletrônicos foi necessário a utilização de velocidades do ar com valor mínimo entre 1 e 4 m/s.

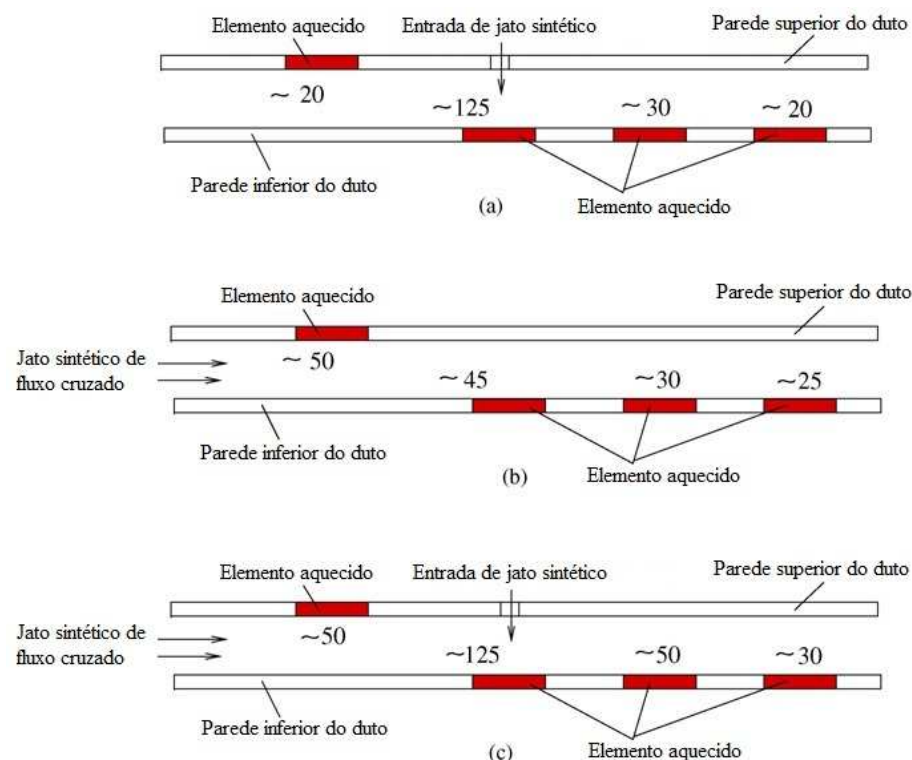


Figura 2.14 – Coeficientes de transferência de calor para as diferentes configurações de fluxo. (a) incidência direta. (b) fluxo cruzado. (c) fluxo combinado  
Fonte: Adaptado de Chaudhari *et al.* (2010b).

Como resultados deste experimento, Chaudhari *et al.* (2010b) constataram que jatos sintéticos podem ser usados em arrefecimento mas fazem uma ressalva de que pode ocorrer

uma degradação de até 10% no desempenho caso o fluido expelido já aquecido seja sugado de volta para a cavidade do atuador. Também relacionam a equivalência no desempenho de arrefecimento entre ventiladores do tipo *cooler* e os jatos sintéticos de fluxo cruzado, que necessitam de uma menor potência de entrada.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada a apresentação das características, parâmetros e equações do fluido e transferência de calor envolvidas no arrefecimento utilizando jatos sintéticos.

#### 3.1 CONVECÇÃO

A convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e advecção. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. Na Fig. 3.1, é apresentado o processo de resfriamento de um bloco quente por ar frio soprando sobre sua superfície superior.

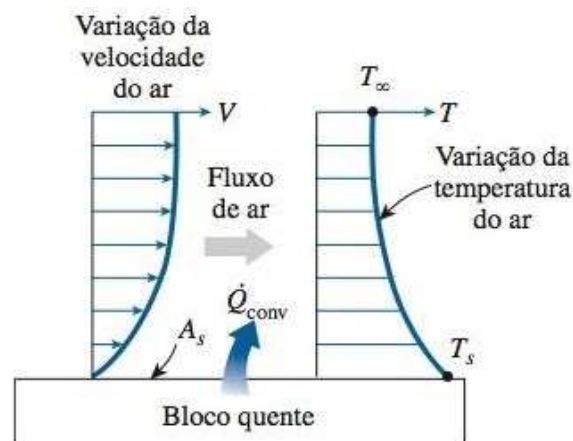


Figura 3.1 – Transferência de calor por convecção.  
Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

A convecção forçada ocorre, quando o escoamento sobre o bloco quente é causado por meios externos tais como um ventilador, uma bomba, ou ventos atmosféricos. Como exemplo de convecção forçada, a Fig. 3.2(a) apresenta a utilização de um ventilador, propiciando ventilação por convecção forçada a ar em diversas placas. Para o caso de convecção natural, o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo originadas a partir da diferença de massas específicas causadas por variações de temperatura do fluido. Para exemplo de convecção natural, a Fig. 3.2(b) apresenta diversas placas quentes dispostas verticalmente e expostas ao ar. Na convecção natural a transferência de calor entre o bloco e o ar circundante será por condução se a diferença entre a temperatura do ar e do bloco não for grande o suficiente

para vencer a resistência para o movimento do ar e então ocorrer as correntes de convecção natural.

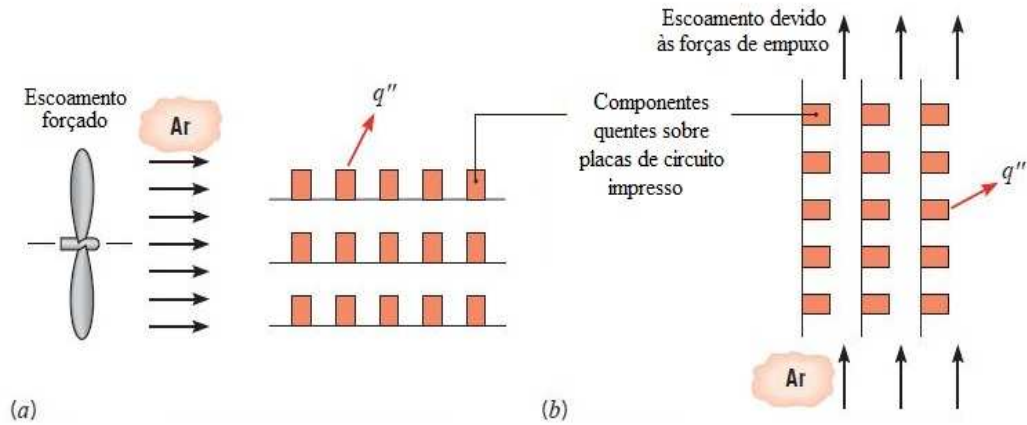


Figura 3.2 – Transferência de calor por convecção (a) convecção forçada. (b) convecção natural.

Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2011).

A taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, definida pela Eq. 3.1 expressa de acordo com a lei de resfriamento de Newton.

$$q = h A_S (T_S - T_\infty) \quad (3.1)$$

onde  $q$  é a taxa de transferência de calor por convecção,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção,  $A_S$  é a área da superfície por meio da qual a transferência de calor por convecção ocorre,  $T_S$  é a temperatura da superfície e  $T_\infty$  é a temperatura do fluido suficientemente distante da superfície. Lembrando que, na superfície aquecida, a temperatura do fluido é igual à temperatura da superfície.

O funcionamento do experimento está baseado no diagrama da Fig. 3.3, que representa uma superfície de comprimento característico  $L$  (utilizado na definição de número de Nusselt), que é aquecida por um elemento de resistência alimentado por tensão elétrica  $E$ , que ocasiona uma corrente elétrica  $I$  que circula através do resistor. Através dos dados do elemento de aquecimento, é possível determinar o fluxo térmico da superfície aquecida. O escoamento sobre a superfície aquecida é fornecido pelo jato sintético, formado a partir da oscilação de um alto-falante alimentado por um sinal elétrico senoidal de amplitude definida e frequências variadas de acordo com o teste. A presença do jato sintético resulta em uma redução mensurável de temperatura de superfície  $T_S$ , assim como é possível medir a temperatura ambiente  $T_\infty$ .

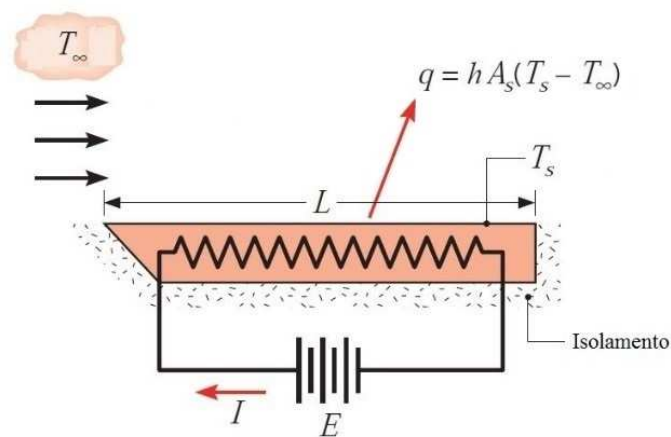


Figura 3.3 – Transferência de calor por convecção.  
Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2011).

Atualmente, a maneira tradicional de dissipação de calor em dispositivos eletrônicos é através da convecção forçada a ar. O dispositivo eletrônico em funcionamento é colocado em contato direto com peças metálicas conhecidas como dissipadores, normalmente aletadas e com condutividade térmica relativamente elevada, como mencionado em bibliografias tradicionais sobre transferência de calor e também em trabalhos de diversos pesquisadores, como por exemplo Mahalingam *et al.* (2007). Estes dissipadores de calor aletados são fabricados geralmente em alumínio, cobre ou uma liga destes dois metais. Com boas propriedades de condutividade térmica, estes materiais também são bons condutores de eletricidade, e por este motivo é necessária a utilização de isolamento elétrico entre o dissipador e o dispositivo eletrônico a ser arrefecido. Para isso são utilizadas a pasta térmica, que proporciona um bom contato, em conjunto com fina chapa de mica, que possui alta rigidez dielétrica.

A dissipação de calor tradicional, baseada na convecção forçada, é realizada com a utilização de ventiladores, conhecidos como *coolers*. Estes ventiladores possuem taxas de volume de ar elevadas, mas são limitados devido ao formato e problemas de ruído, baixa confiabilidade a longo prazo, e eficiência térmica reduzida (MAHALINGAM *et al.*, 2004).

### 3.2 NÚMERO DE REYNOLDS E STROUHAL

Em um escoamento oscilatório, conforme White (2011), as forças e momentos adimensionais, atrito e transferência de calor etc. são uma função dos números de Reynolds e Strouhal. Ainda de acordo com White (2011), alguns escoamentos que podem parecer

perfeitamente permanentes na realidade têm um padrão oscilatório, e um exemplo disso é a emissão periódica dos vórtices gerados por jatos sintéticos.

Em jatos sintéticos, o número de Reynolds ( $Re$ ) caracteriza o escoamento do fluido baseado na velocidade média do jato ( $U_o$ ). Em dutos retangulares, como é o caso deste experimento, o número de Reynolds pode ser definido aplicando a Eq. 3.2.

$$Re_{U_o} = \frac{\rho U_o D_h}{\mu} \quad (3.2)$$

sendo  $D_h$  o diâmetro hidráulico do orifício de saída do jato sintético,  $\mu$  a viscosidade dinâmica e  $\rho$  a massa específica do fluido. A razão destas grandezas resulta na viscosidade cinemática de acordo com a Eq. 3.3.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.3)$$

O número de Strouhal ( $St$ ) é definido de acordo com a Eq. 3.4 e define a frequência adimensional característica do problema, no caso deste experimento a frequência de oscilação do alto-falante funcionando como membrana no gerador de jatos sintéticos. Para isso, utiliza a frequência ( $f$ ) de oscilação da membrana.

$$St = \frac{f D_h}{U_o} \quad (3.4)$$

De acordo com Potter e Wiggert (2011), o número de Strouhal é um parâmetro importante em escoamentos onde se tem situação com componente não-permanente, ou seja, que se repete periodicamente. Isto se relaciona diretamente com o funcionamento dos jatos sintéticos.

Relacionado a parâmetros térmicos tem-se o número de Nusselt ( $Nu$ ), adimensional, que é a razão entre a transferência de calor por convecção e somente por condução e é definido pela Eq. 3.5:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.5)$$

sendo  $k$  a condutividade térmica do fluido, no caso deste experimento está sendo utilizado ar, e  $L$  é o comprimento do elemento de aquecimento. O número de Nusselt representa para a camada-limite térmica o que o coeficiente de atrito representa para a camada-limite de velocidade.

Neste experimento o jato sintético é direcionado e emitido por um duto retangular com dimensões internas de 5 mm x 20 mm que equivalem a um diâmetro hidráulico ( $D_h$ ) de 8 mm, obtido pela Eq. 3.6.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3.6)$$

em que  $A$  é a área e  $P$  é o perímetro da seção transversal interna do duto.



## 4 ESTUDO EXPERIMENTAL - METODOLOGIA

Este capítulo é destinado à apresentação e descrição do desenvolvimento e montagem da bancada experimental, com a descrição do aparato de equipamentos utilizados, os modos e realização dos testes e medições, bem como a coleta e tratamento dos dados obtidos. Os testes serão realizados em bancada experimental desenvolvida exclusivamente para esta finalidade, objetivando determinar a taxa de transferência de calor e a capacidade de arrefecimento do jato sintético com um elemento de aquecimento simulando um dispositivo eletrônico em funcionamento e comparando com o arrefecimento por *coolers*, comumente utilizado em resfriamento eletrônico.

### 4.1 ELABORAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Para verificar experimentalmente o arrefecimento por jato sintético tangencial, no desenvolvimento da bancada experimental foram tomados como referência o experimento desenvolvido por Woyciekoski (2013) e a simulação realizada por Munhoz (2012), e após diversas análises se obteve como melhor opção o projeto da bancada experimental com jatos sintéticos tangenciais desenvolvido e aperfeiçoado conforme necessidade em software de CAD, o SolidWorks. A bancada é apresentada na Fig. 4.1 em perspectiva para visualização geral, em vista superior para melhor visualização do duto de escoamento com o posicionamento do elemento de aquecimento, e em vista lateral onde é possível visualizar o gerador de jatos sintéticos através do acoplamento de alto-falante como membrana.

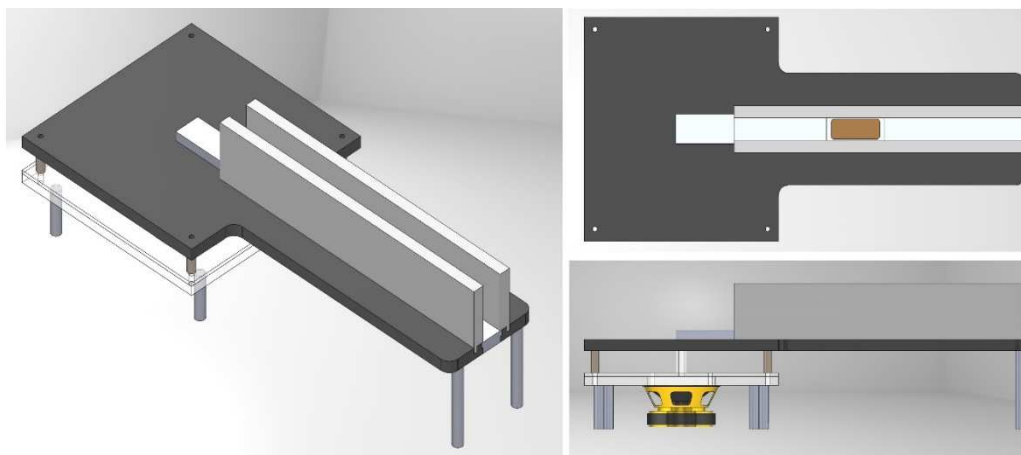


Figura 4.1 – Projeto da bancada experimental criado no software SolidWorks.

Objetivando maior detalhamento do projeto desenvolvido em SolidWorks, é apresentado na Fig. 4.2 a perspectiva em corte longitudinal da lateral da bancada, onde é possível visualizar os principais itens que a compõem como o atuador de jato sintético que é a membrana de um alto-falante, a cavidade formada entre a membrana e a placa de acrílico, o duto de saída e direcionamento do jato que tem o escoamento delimitado pelas paredes do duto de escoamento, e também o elemento de aquecimento confeccionado em cobre.

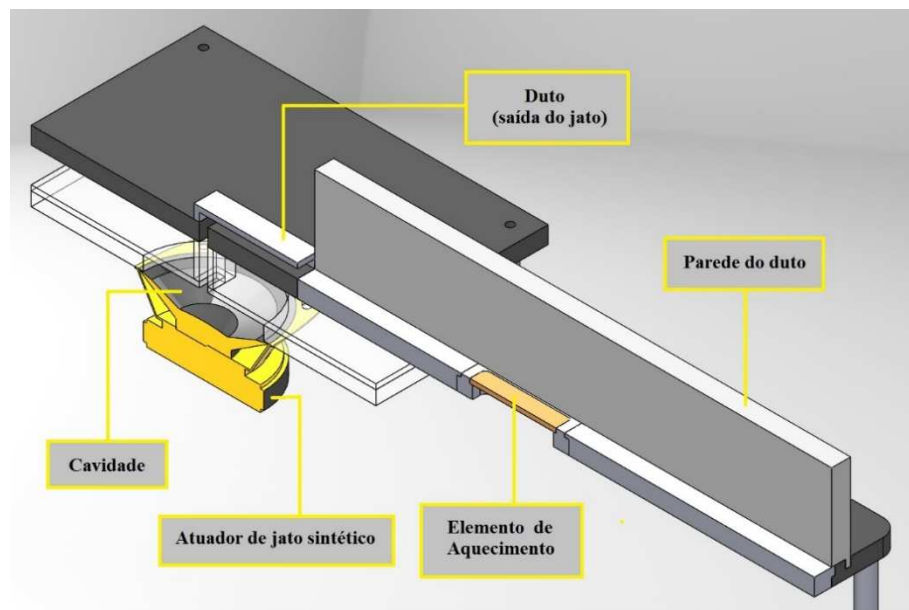


Figura 4.2 – Perspectiva em corte do projeto da bancada experimental.

A bancada, montada especialmente para utilização neste experimento, consiste em um dispositivo de estrutura formada com placas em acrílico de variadas espessuras de acordo com a aplicação e exigência de esforço, e também identificada por cores para diferenciar peças fixas e móveis que a compõem. Foi elaborada e desenvolvida, em parte, a partir de outros trabalhos e pesquisas realizadas com jatos sintéticos através de simulação computacional, experimentos realizados e artigos já publicados, inclusive realizados neste curso de mestrado por Munhoz (2102) e Woyciekoski (2013). Na montagem da bancada experimental, um dos componentes mais importantes é o atuador de jatos sintéticos formado por um alto-falante funcionando como membrana, com impedância de  $4 \Omega$ , diâmetro do cone de 76 mm e potência de  $30 W_{rms}$ , sendo a cavidade e o orifício formados por placas de acrílico, conforme mostra a Fig. 4.3.

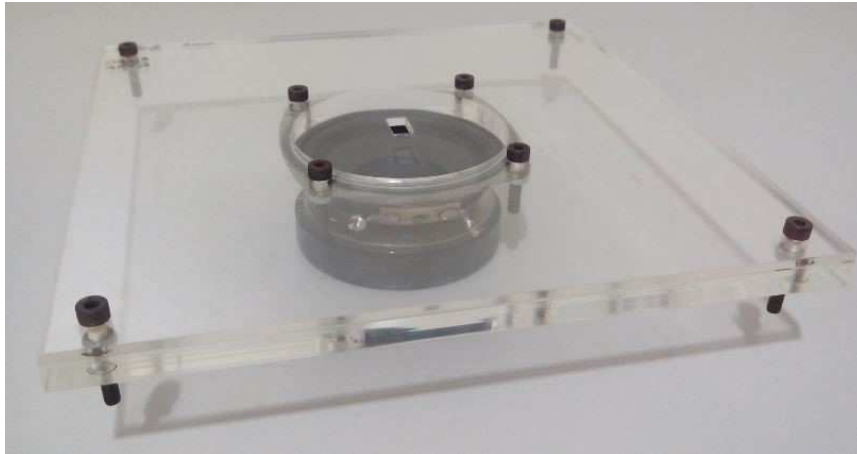


Figura 4.3 – Atuador de jatos sintéticos.  
Fonte: Adaptado de Woyciekoski (2013).

Em relação ao perfil de escoamento do jato sintético para arrefecimento de elemento de aquecimento, foi utilizado a geometria do perfil horizontal desenvolvido e simulado por Munhoz (2012). Neste perfil, ou canal de escoamento horizontal, há o elemento de aquecimento disposto na parede inferior do canal e que poderá ser posicionado a diferentes distâncias em relação à saída do jato do duto. Esta distância é de 15 a 40 vezes a altura do duto por onde ocorre a ejeção do jato sintético, que é de 5 mm, com escolha de valores a cada 5 alturas deste mesmo duto. A distância entre o orifício de saída do jato e o elemento de aquecimento localizado no duto de escoamento da bancada experimental é de rápida alteração, realizada com peças intercambiáveis, utilizando peças de encaixe perfeito na ranhura da bancada, preenchendo os espaços deixados após o posicionamento do elemento de aquecimento na distância desejada, conforme mostra a Fig. 4.4. A ranhura, onde são posicionados o elemento de aquecimento e as peças intercambiáveis de preenchimento, é o que forma a parte inferior do duto de escoamento e por este motivo necessita de excelente vedação para que não ocorra vazamento do fluido de arrefecimento durante os testes de resfriamento com a bancada experimental em funcionamento.

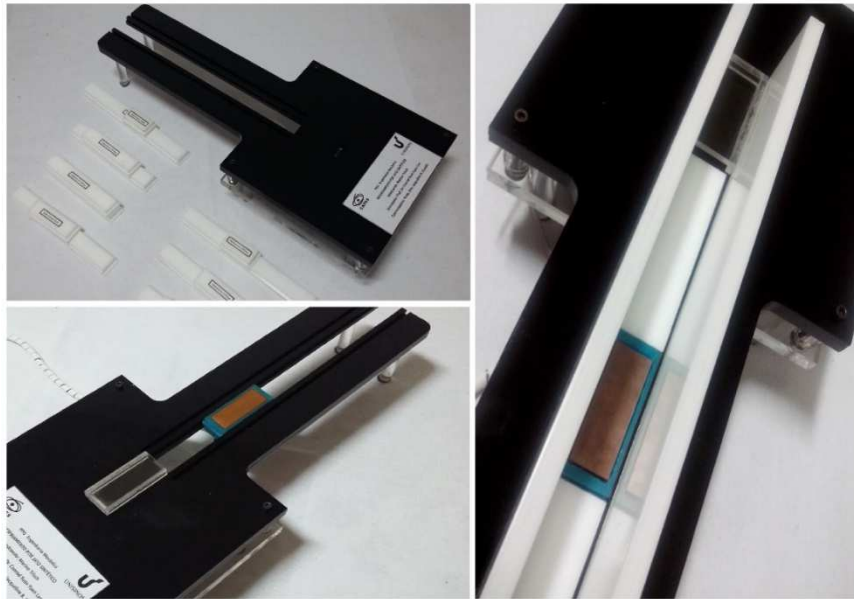


Figura 4.4 – Montagem do elemento de aquecimento e formação do duto de escoamento na bancada experimental.

Visando a obtenção mais exata e confiável possível dos dados durante os testes realizados, desde o início da elaboração do projeto foi destinada muita atenção a detalhes e precisão nas medidas e encaixe perfeito das peças utilizadas para a montagem do sistema experimental. Inicialmente houve a possibilidade do corte das peças em acrílico em dimensões aproximadas e então a execução de usinagem das mesmas de acordo com medidas estipuladas em projeto criado no software SolidWorks. Devido dificuldade na obtenção de fornecedor para serviços de usinagem de peças em acrílico e provável alto custo de execução do serviço, se optou por dividir a bancada projetada em maior número de peças e realizar corte a laser, executando a união das mesmas através de cola especial para o tipo de material utilizado.

A bancada experimental desenvolvida é mostrada com mais detalhes na Fig. 4.5, onde são apresentados o atuador de jatos sintéticos e o duto para redirecionamento do jato e escoamento do fluido de arrefecimento. Também pode ser visto na Fig. 4.5 o elemento de aquecimento com o resistor para simulação de dispositivo eletrônico em funcionamento e os sensores LM35 para monitoramento da temperatura através de controle eletrônico apresentado posteriormente com detalhes.

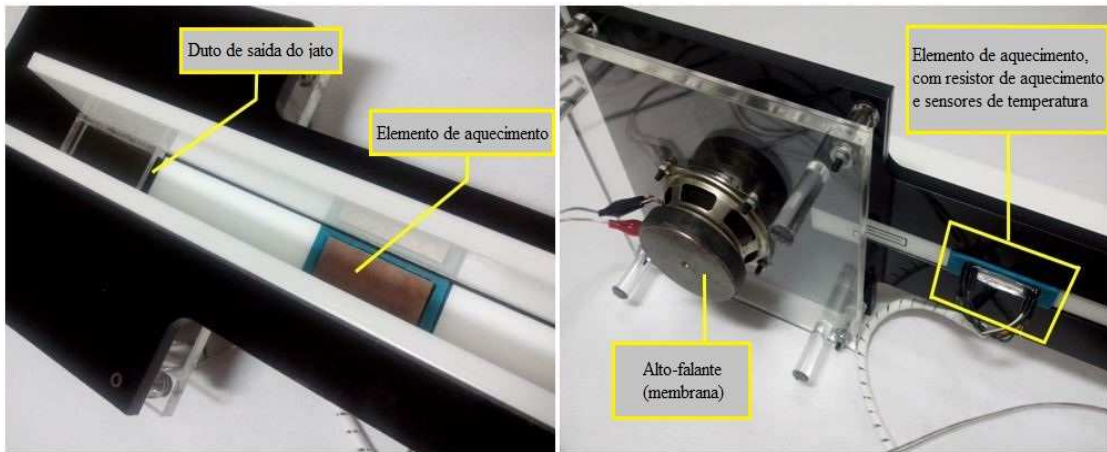


Figura 4.5 – Bancada experimental desenvolvida.

A bancada experimental possui em um único conjunto o sistema atuador para geração de jatos sintéticos que é um alto-falante acoplado, em posição vertical, com o ímã posicionado para baixo. Com o cone voltado para cima, o alto-falante é fixado por parafusos à bancada experimental nas placas de acrílico cristal, uma com orifício central de diâmetro de 76 mm e outra de orifício retangular com medidas 5 mm x 20 mm para expulsão do jato sintético.

#### 4.2 ELEMENTO DE AQUECIMENTO

O elemento de aquecimento citado e mostrado anteriormente, tem o propósito de simular um dispositivo eletrônico em funcionamento. O dispositivo, produzido com material resistente ao calor, é perfeitamente ajustado na bancada experimental dentro do duto por onde ocorre o escoamento do fluido de resfriamento. A distância do elemento de aquecimento em relação à saída do jato pode ser ajustada facilmente através da utilização da ranhura existente na bancada experimental e disponibilidade de diversos tamanhos de peças em acrílico para fechamento do restante da ranhura da bancada experimental. Este fechamento é necessário para que não ocorram perdas no escoamento do fluido pelo interior do duto.

Mostrado na Fig. 4.6, o elemento de aquecimento é fabricado em cobre nas dimensões de 50 mm x 18 mm x 2 mm, onde então são fixados o resistor cerâmico responsável pelo aquecimento e também os sensores de temperatura LM35, que realizam a medição de temperatura do elemento de aquecimento.

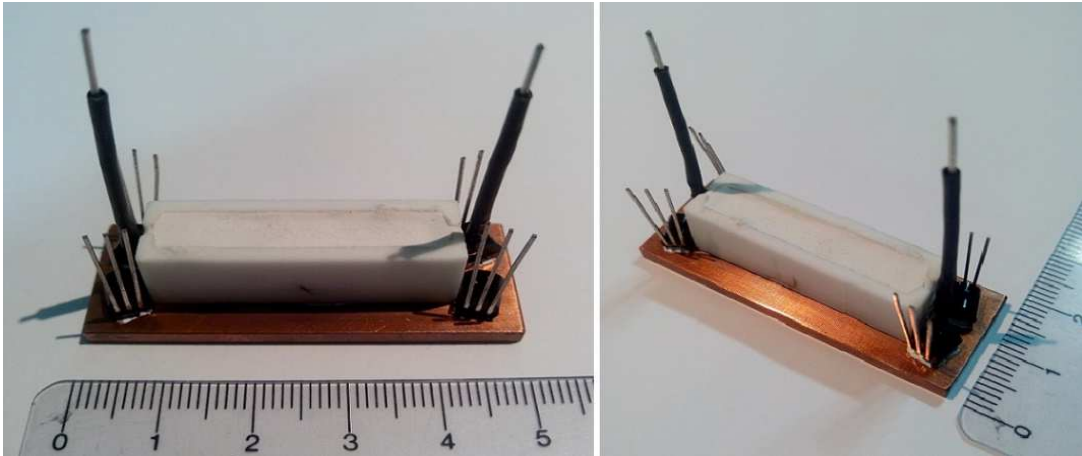


Figura 4.6 – Elemento de aquecimento com resistor cerâmico e sensores de temperatura.

Para o acoplamento do elemento de aquecimento à bancada experimental foi utilizado uma peça adaptadora confeccionada em tecnil, material mais resistente ao calor se comparado ao acrílico, e que tem a função de isolar termicamente o elemento de aquecimento e a estrutura de acrílico da bancada. A junção entre o resistor cerâmico e o elemento de aquecimento mostrada anteriormente na Fig. 4.6, foi realizado com a utilização de pasta térmica para propiciar melhor transferência de calor, e para fixação foi realizada com utilização de cola do tipo epóxi e resistor recoberto por cola resistente a altas temperatura para concentrar a transferência de calor para o elemento de aquecimento e aumentar a vida útil da cerâmica do resistor frente às temperaturas elevadas utilizadas no experimento. A Fig. 4.7 apresenta o elemento de aquecimento e o adaptador de tecnil, assim como o conjunto acoplado na ranhura da bancada experimental a 100 mm de distância do orifício de saída do jato.

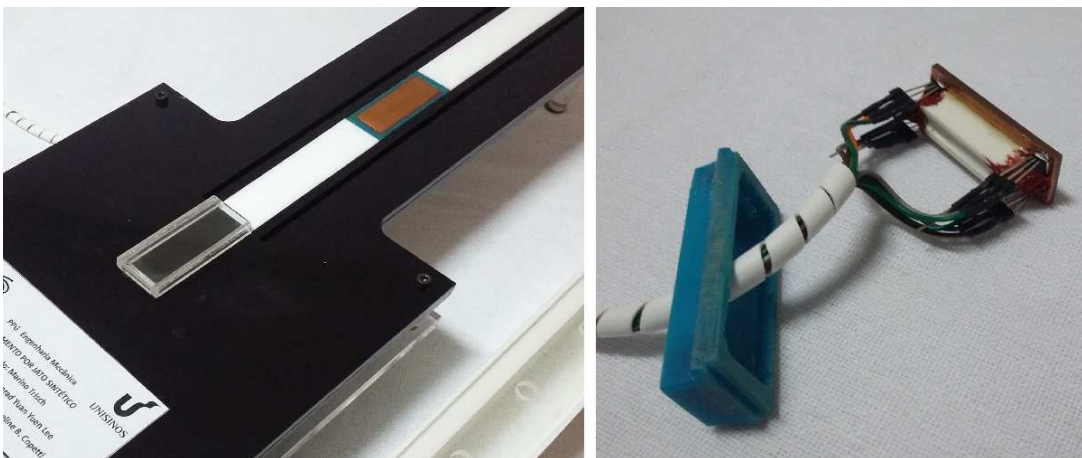


Figura 4.7 – Elemento de aquecimento acoplado à bancada.

De extrema importância no procedimento experimental e obtenção de dados de resfriamento por jatos sintéticos realizado na bancada, o elemento de aquecimento precisou passar por diversos ajustes, reparos e substituições do resistor cerâmico durante a captação de dados de resfriamento devido à quebra da cerâmica pela alta temperatura a que fica exposto durante os testes com a bancada experimental.

#### 4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para o desenvolvimento experimental, são necessários o circuito eletrônico e diversos instrumentos para auxiliar na medição e controle. O aparato necessário e em funcionamento é mostrado na Fig. 4.8. Um gerador de sinais (EduTec EEL-8019) gera a forma de onda senoidal para o alto-falante. O sinal fornecido pelo gerador de sinal, antes de chegar ao alto-falante, é amplificado utilizando um amplificador de áudio (National Instruments TPA3116) que é monitorado por um multímetro digital (Minipa ET-2231A) e um osciloscópio digital (Minipa MO-2061). Um anemômetro de fio quente portátil (Kimo Instruments VT50) é utilizado para medir a velocidade média de jato em vários pontos ao longo do canal.

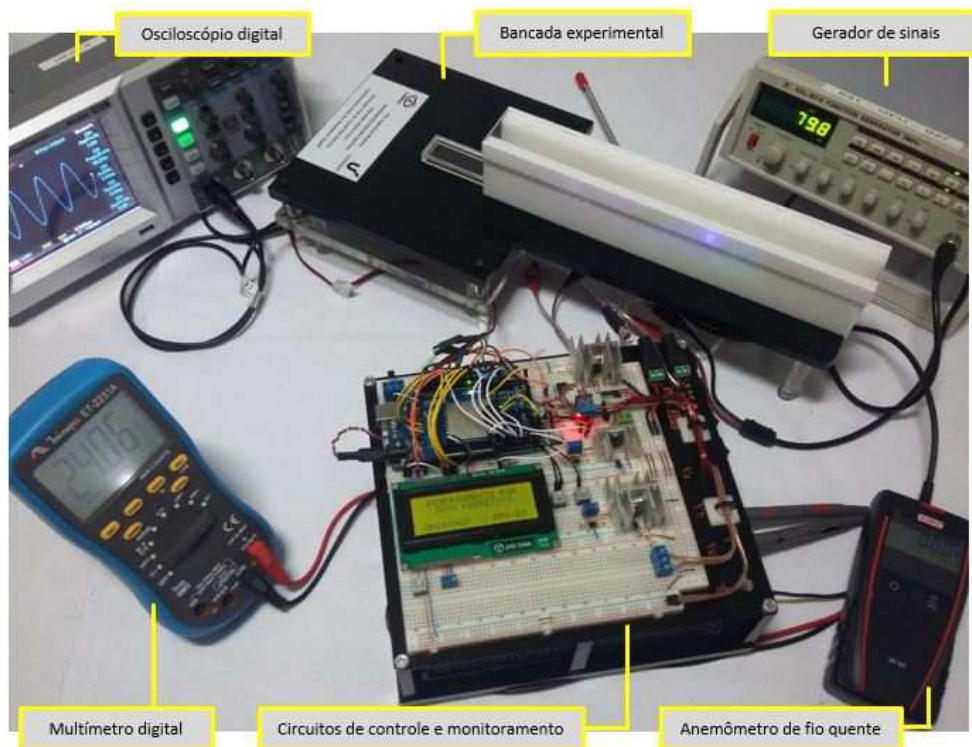


Figura 4.8 – Aparato de instrumentos para medição e controle.

O equipamento gerador de sinais é responsável por fornecer a forma de onda senoidal de frequência adequada ao funcionamento do atuador e membrana do alto-falante. Este sinal

senoidal proveniente do gerador de sinais é de baixa amplitude e necessita de um amplificador de áudio para aumentá-la sem distorções na forma de onda fornecida e, principalmente, permite realizar o casamento de impedâncias entre o equipamento gerador de sinais que possui saída de  $50 \Omega$  e o alto-falante com  $4 \Omega$ .

O osciloscópio é utilizado para verificar o sinal aplicado ao alto-falante, mantendo acompanhamento contínuo dos valores de amplitude e frequência da onda senoidal utilizada. O multímetro digital é utilizado em paralelo ao sistema eletrônico desenvolvido, com a finalidade de executar acompanhamento constante do valor da diferença de potencial elétrica (DDP) aplicada ao resistor cerâmico acoplado ao elemento de aquecimento da bancada e garantir as medições realizadas pelo sistema eletrônico desenvolvido e que os valores experimentais sejam condizentes.

Para a medição de temperatura do elemento de aquecimento, são utilizados sensores de temperatura LM35 fabricado pela Texas Instruments. De acordo com o fabricante, os sensores possuem precisão de  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , e variação de temperatura média entre  $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,75 \text{ }^\circ\text{C}$  em medições realizadas dentro de sua faixa de temperatura que é de  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Não necessitam de calibração externa, e pequenos ajustes podem ser realizados através do software de controle do circuito desenvolvido para o experimento e apresentado mais adiante com detalhes.

Mostrado na Fig. 4.9, o sensor de temperatura LM35 possui três pinos de conexão elétrica, sendo que dois deles necessitam de alimentação por uma diferença de potencial entre  $4 \text{ V}$  e  $20 \text{ V}$ ; neste experimento é utilizada referência de  $5 \text{ V}$  devido equivalência com a tensão da plataforma Arduino. Para indicar o valor de temperatura, fornecem no pino de saída uma diferença de potencial linear de  $10 \text{ mV}$  para cada grau de temperatura a que são expostos. Neste experimento, estão fixados diretamente em contato com o elemento de aquecimento, dividindo espaço com o resistor cerâmico.



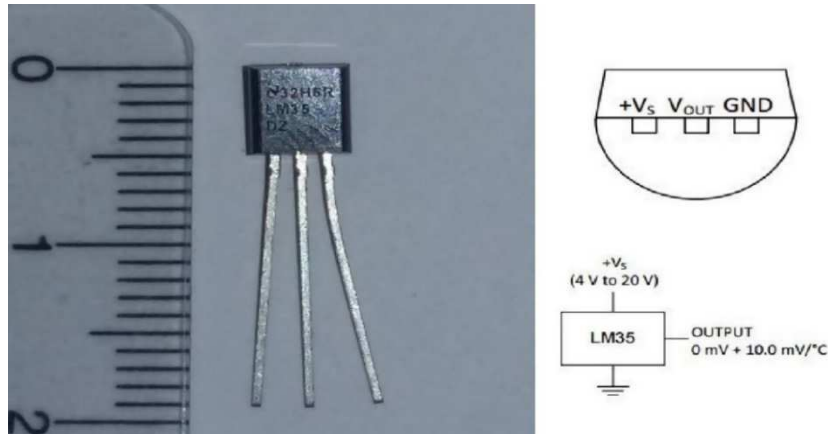


Figura 4.9 – Detalhamento do sensor de temperatura LM35.  
Fonte: Adaptado de Texas Instruments.

Mostrada na Fig. 4.10, a plataforma Arduino Mega 2560 tem como principal finalidade o controle do funcionamento do experimento, executando o programa desenvolvido especialmente para tal, de modo a manter o funcionamento adequado da bancada experimental de resfriamento por jatos sintéticos, informando e armazenando os dados de aquecimento e resfriamento coletados. A plataforma disponibiliza um plugue para alimentação elétrica, uma conexão USB e um botão de reset. Além das boas especificações de hardware, a plataforma também apresenta facilidade no desenvolvimento de software para as aplicações de implementação da plataforma. Há, conectado aos bornes do Arduino, o Shield do SD Card - uma placa de expansão de hardware acoplada à placa base visando o armazenamento dos dados e parâmetros de temperaturas e controle de potência do elemento de aquecimento da bancada de acordo com os testes experimentais realizados.

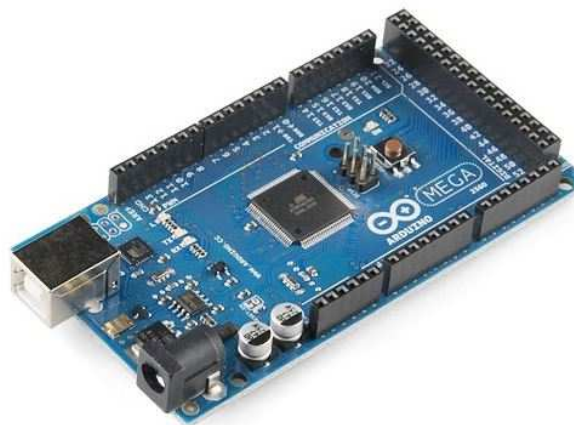


Figura 4.10 – Detalhamento da plataforma Arduino.  
Fonte: Adaptado de ARDUINO.

Os circuitos eletrônicos de potência e controle apresentado em detalhes na Fig. 4.11, foram montados em matriz de contatos conhecida como *proto-board*. O sistema de controle foi especialmente elaborado para controlar o funcionamento e obter dados relacionados ao experimento desenvolvido com a bancada, sendo formado pela plataforma Arduino Mega 2560 para funcionamento do programa criado e processamento das informações, acoplado a ele um Shield de SD Card para armazenar os dados experimentais coletados. Como mostra a Fig. 4.11, no entorno da plataforma Arduino e para garantir o funcionamento adequado da bancada experimental, são necessários dispositivos e circuitos eletrônicos auxiliares:

- dispositivo *shield* com SD Card, acoplado à plataforma Arduino, para armazenamento dos dados experimentais obtidos;
- chaves de liga e desliga responsáveis pela interrupção individual da alimentação dos diversos circuitos de potência e controle;
- *display* indicador de cristal líquido (LCD), onde são expostas as informações de parâmetros e controles do Arduino em relação ao funcionamento e dados obtidos com a bancada experimental;
- chaves responsáveis pela seleção de funcionalidades dos circuitos e execução das trocas de telas informativas no *display*;
- sensor de corrente não invasivo, que realiza a medição da corrente elétrica que circula através do resistor de aquecimento;
- circuitos de potência e controle formados por resistores, transistores e reguladores de tensão com os respectivos potenciômetros de ajuste e dissipadores de calor;
- conectores de acoplamento rápido de dispositivos externos ao circuito de controle da matriz de contatos, como os sensores de temperatura e resistor de aquecimento localizados na bancada experimental.

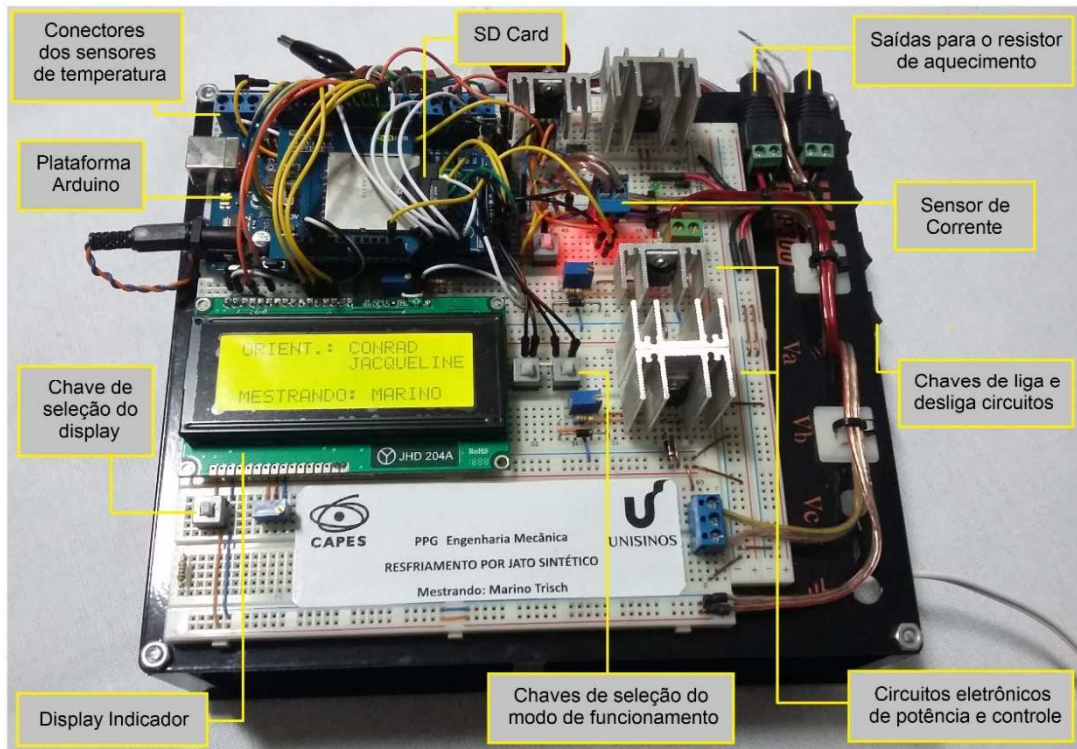


Figura 4.11 – Circuitos eletrônicos montados em matriz de contatos.

A plataforma Arduino funciona através de programa computacional desenvolvido em software específico, elaborado em microcomputador e transferido por cabo USB (*Universal Serial Bus*) que também executa a comunicação em duas vias, entre a plataforma e o microcomputador para verificação constante do funcionamento e eventuais alterações necessárias.

Ainda referente ao sistema eletrônico, em compartimento de acrílico adicionado na parte inferior à plataforma Arduino e circuitos eletrônicos montados na *proto-board*, foram acondicionadas as fontes de alimentação necessárias ao funcionamento dos circuitos eletrônicos da bancada experimental. Para o fornecimento de tensão adequada sem flutuações, foi necessária a utilização de uma fonte chaveada que recebe a alimentação elétrica 220 Vac (corrente alternada) e a converte para 24 Vcc (corrente contínua) e com capacidade de 5 A, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.12. Na mesma figura, é possível visualizar os conversores corrente contínua que realizam a conversão dos 24 Vcc da saída da fonte chaveada para tensões elétricas de 12 Vcc e 5 Vcc para o funcionamento dos *coolers* e do *backlight* do display. Se utiliza este rebaixamento de tensão para utilização no sistema eletrônico e também por motivo de segurança de operação, para não expor o utilizador da bancada a risco de choque elétrico.

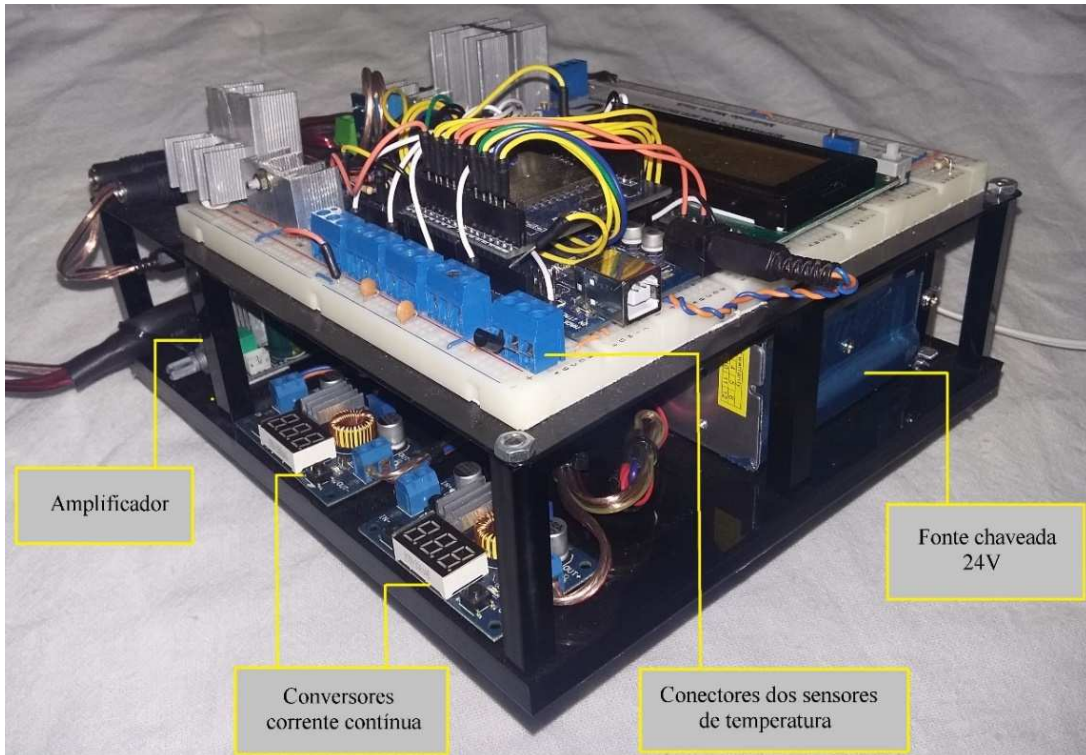


Figura 4.12 – Fontes de alimentação para os circuitos eletrônicos de controle e potência.

### 4.3.1 Circuito de Controle

A plataforma Arduino Mega 2560, contém internamente um microcontrolador ATmega2560 de 10 bits, e possui 54 pinos que podem ser programados como saídas ou entradas digitais, sendo que 14 deles podem ser usados como saídas PWM, e mais 16 pinos de entradas analógicas que possuem ADCs (conversores analógico-digital) de 10 bits que convertem o sinal analógico dos sensores, em sinais digitais equivalentes para serem processados. Os ADCs são responsáveis por dividir um sinal analógico em diversos degraus digitais binários, sendo estes degraus considerados a precisão do sistema.

A escolha pela utilização do Arduino Mega 2560 neste experimento se deve principalmente a disponibilidade das entradas analógicas de ADC de 10 bits. Nestas entradas são conectados os sensores de temperatura que fornecem os sinais analógicos de certo níveis de tensão analógica. O sinal digital de 10 bits também possibilita bom valor de resolução, definida pela Eq. 4.1.

$$Resolução = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (4.1)$$

onde  $V_{ref}$  é a tensão de referência do sistema e  $2^n$  é o valor de divisões do sistema binário. Para esta aplicação, o valor definido para a  $V_{ref}$  é de 5 V, e por se tratar de um sistema de 10 bits o valor de divisões equivale a 1024 combinações ou degraus possíveis se convertido em sistema digital. Na Fig. 4.13 é apresentado o circuito eletrônico de conexões elétricas entre os sensores LM35 de medição de temperatura e as entradas analógicas da plataforma Arduino.

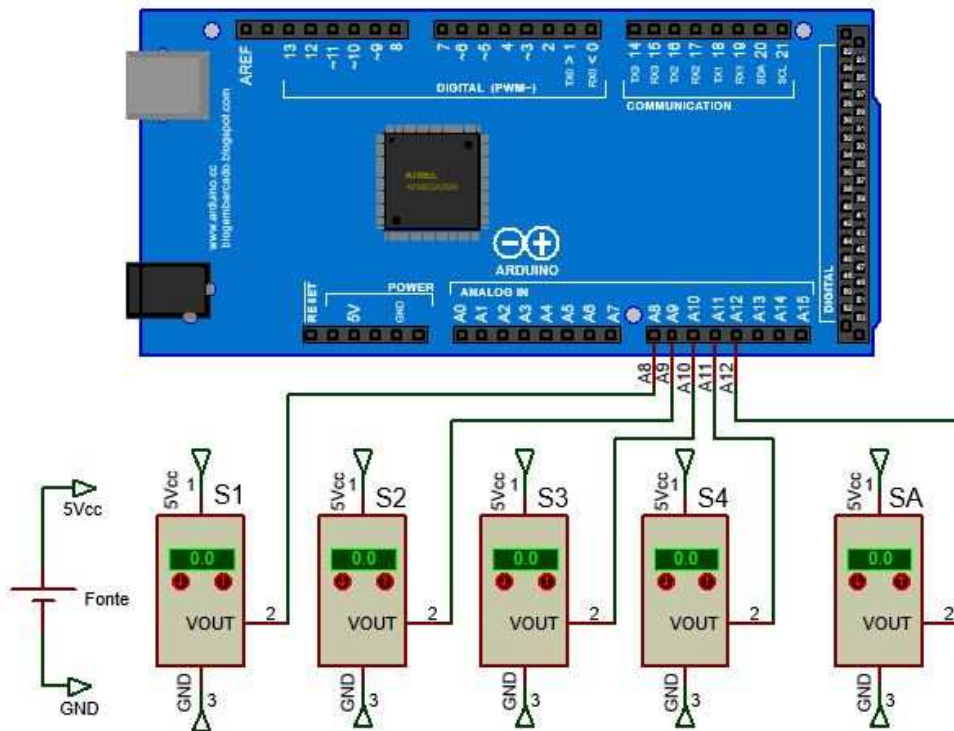


Figura 4.13 – Circuito de medição de temperatura da bancada experimental.

A principal variável que o sistema eletrônico considera no funcionamento da bancada experimental é a temperatura do elemento de aquecimento, adquirida através da média aritmética do valor da temperatura medida por quatro sensores de precisão LM35 que estão conectados às entradas analógicas A8 até A12 da plataforma Arduino. Estes sinais são processados de acordo com a programação executada pelo Arduino e têm os valores indicados no display e armazenados em forma de planilha no SD Card. Os sensores de temperatura, com exceção do sensor que realiza a medição da temperatura ambiente, são fixados ao elemento de aquecimento juntamente com o resistor cerâmico.

Na Fig. 4.14 é mostrado o circuito desenvolvido para visualização e armazenamento em dispositivo SD Card dos dados experimentais da bancada experimental coletados e processados pela plataforma Arduino. Foram utilizados neste circuito um elemento auxiliar para plataforma

Arduino conhecido como Shield SD Card v2.0 para acoplamento do cartão de memória, um display de 4 linhas por 20 colunas na cor verde com função de retroiluminação conhecida como *backlight*, e demais componentes como chaves de seleção, potenciômetros e resistores.

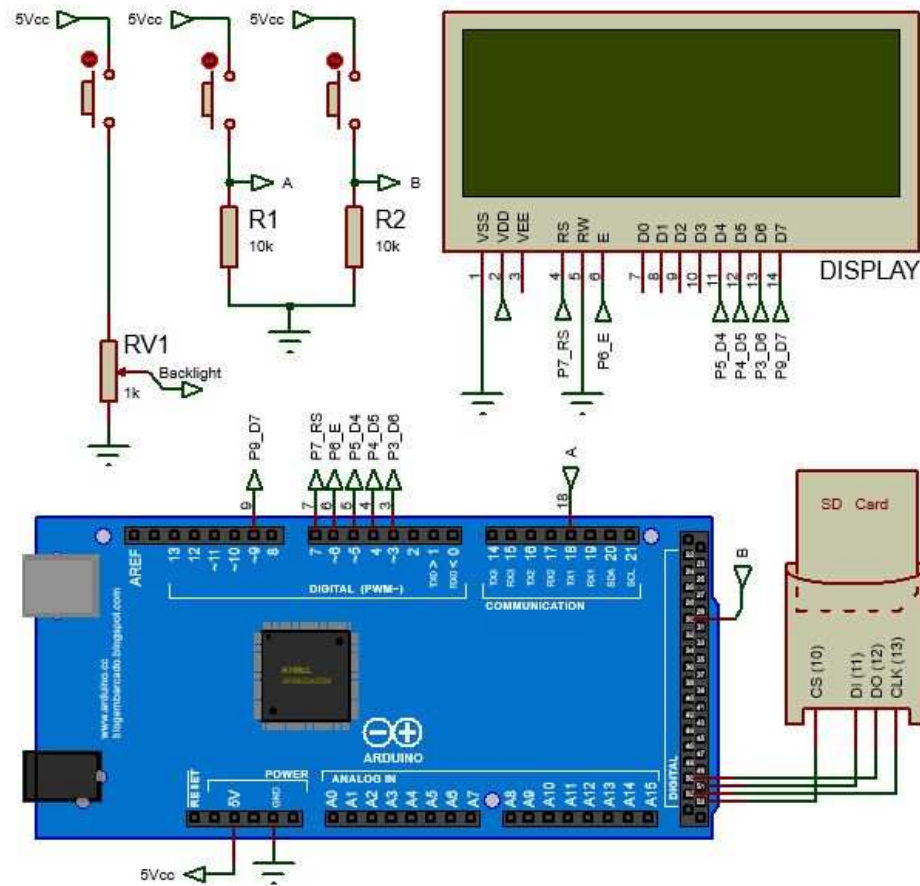


Figura 4.14 – Circuito de indicação e armazenamento de dados da bancada experimental.

### 4.3.2 Circuito de Potência

O circuito de potência, utilizado principalmente no controle de aquecimento do resistor cerâmico e conseqüentemente do elemento de aquecimento da bancada experimental, é constituído de componentes eletrônicos que apresentam características adequadas ao controle confiável de correntes elétricas mais elevadas em relação ao limite permitido para a plataforma Arduino. Na Fig. 4.15 é possível visualizar em um esquema completo os diversos circuitos eletrônicos desenvolvidos, como circuitos de variação de tensão e controles acoplados às saídas da plataforma Arduino para desenvolvimento adequado dos procedimentos de teste utilizando a bancada experimental.

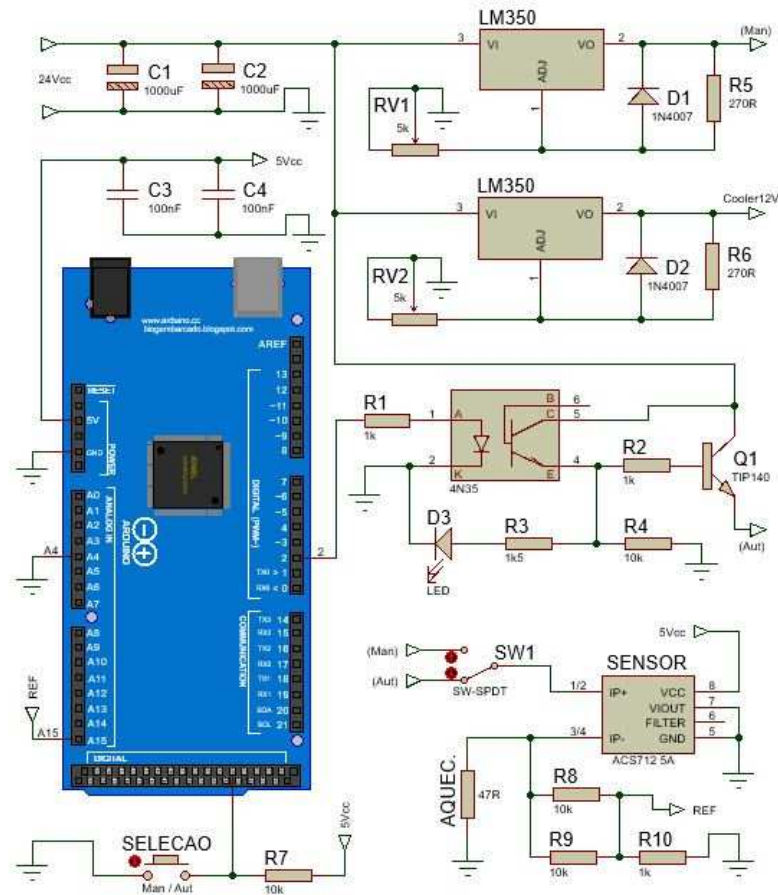


Figura 4.15 – Circuito eletrônico de potência e controle da bancada experimental.

#### 4.4 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM FUNCIONAMENTO PWM

O funcionamento do controle PWM nesta aplicação utiliza a média aritmética dos valores lidos pelos quatro sensores de temperatura fixados no elemento de aquecimento. Este valor é utilizado para calcular o tempo de pulso ativo, ou seja, o tempo que o circuito de potência estará ligado. Este processo irá proporcionar controle de potência mais preciso, controlando com precisão a temperatura do elemento de aquecimento.

Um controle automático, de acordo com Ogata (2003), compara o valor real de saída da planta com a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que vai reduzir o desvio a zero ou a um valor pequeno. A Fig. 4.16 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de controle, composto de um controlador automático, uma planta e um sensor (elemento de medida).

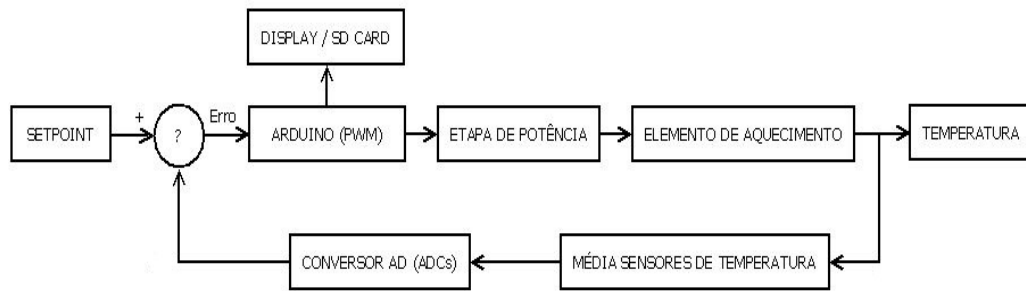


Figura 4.16 – Diagrama em blocos do controle PWM implementado.

Para a verificação, foi realizado aquecimento do elemento da bancada experimental utilizando o modo PWM implementado no código de programação da plataforma Arduino. A partir dos dados obtidos nos 300 segundos de teste para diferentes tipos de resfriamento, os valores foram armazenados no SD Card do Arduino e então elaborado o gráfico de comportamento apresentado na Fig. 4.17.

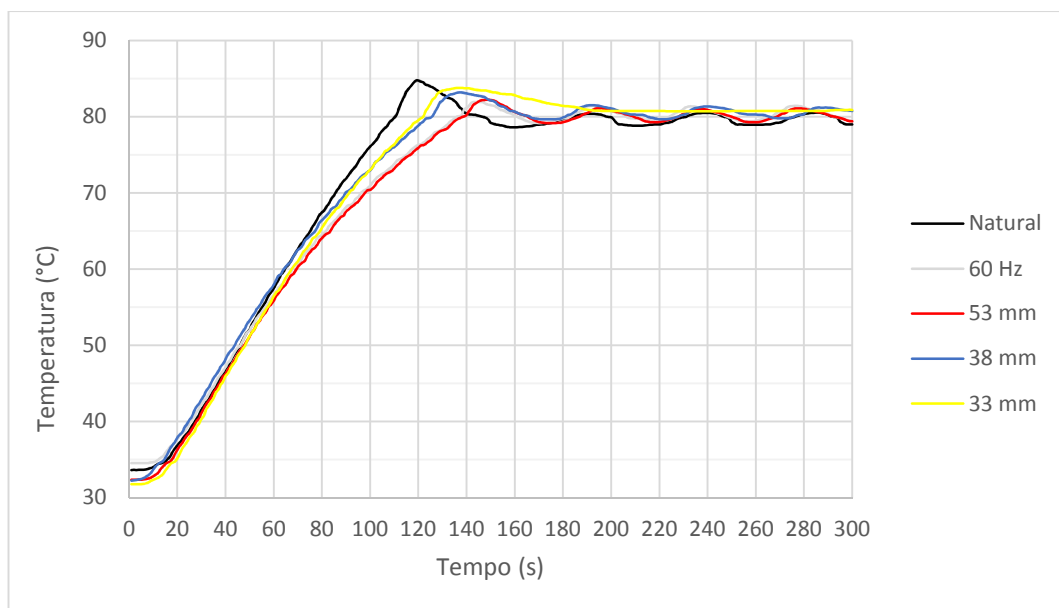


Figura 4.17 – Progressão da temperatura do elemento de aquecimento em modo PWM

Conforme os resultados da Fig. 4.17, a bancada experimental em modo PWM se mostrou funcional, sendo possível programar em software a temperatura alvo que se deseja alcançar, e inclusive selecionar a partir de qual temperatura se deseja que o modo PWM atue e execute uma rampa suave de aumento de temperatura até atingir o valor selecionado. Isso possibilita o controle automático de modo a não ultrapassar o valor máximo de funcionamento adequado de componentes eletrônicos. Este modo funcionamento da bancada experimental,



apesar de não ter sido explorado com variados testes e dados experimentais, pode ser utilizado para simular o aquecimento de um elemento de acordo com o funcionamento de um componente eletrônico que não aquece instantaneamente, mas sim conforme uma rampa de aquecimento.

## 5 ESTUDO EXPERIMENTAL

Este capítulo é destinado à apresentação e descrição do estudo experimental e da metodologia utilizada. Descrevem-se a montagem experimental, testes e medições realizadas e o tratamento dos dados obtidos em relação ao resfriamento de elemento de aquecimento simulando o funcionamento de dispositivo eletrônico.

O experimento teve seus testes realizados em bancada montada em acrílico, com elemento de aquecimento posicionado em linha com o duto onde é expelido o jato sintético gerado por alto-falante funcionando como membrana oscilante geradora do jato sintético. O objetivo é determinar o coeficiente de transferência de calor e a eficiência do jato sintético no resfriamento do elemento de aquecimento.

A bancada experimental desenvolvida possui relação com o experimento realizado por Woyciekoski (2013) devido à utilização do mesmo alto-falante e orifício do jato sintético, apresentando dimensões do elemento de aquecimento similares ao utilizado na simulação computacional desenvolvida por Munhoz (2012). Neste trabalho, a bancada foi desenvolvida e montada utilizando placas acrílicas e diversas outras peças fabricadas com material de acordo com as exigências de temperatura e precisão no duto de escoamento para evitar vazamento dos jatos sintéticos gerados pelo atuador no escoamento tangencial sobre o elemento de aquecimento. Adicionalmente, foram utilizados vários pontos de medição de temperatura no elemento de aquecimento para obter os resultados mais precisos possíveis. Todos dados medidos de forma digital foram armazenados em cartão de memória.

No procedimento experimental de Woyciekoski (2013), o conjunto atuador de jato sintético apresentou frequências de pulsação ideais entre 100 Hz a 200 Hz, onde foi atingida a máxima velocidade média do jato. A limitação do experimento anterior, corrigida no atual experimento, foi a utilização de amplificador de áudio para realizar o casamento de impedância entre o gerador de sinais e o alto-falante utilizado como membrana no conjunto atuador de jatos sintéticos.

Com o gerador de jatos sintéticos em funcionamento, a velocidade média de pico do jato sintético ao longo da extensão do duto foi medida para onze valores de frequência de pulsação do alto falante, entre 20 Hz e 120 Hz com intercalações de 10 Hz. Desta maneira, foi encontrando na atual montagem experimental uma frequência ótima de aproximadamente 60 Hz. onde foram medidas velocidades de jato mais elevadas. Se credita a diferença de frequência ótima entre este estudo e Woyciekoski (2013) à adição do duto para direcionamento do jato até o perfil de escoamento, o que alterou a frequência ressonante característica da bancada. As

medições de velocidade do fluido foram realizadas em diversos pontos do duto de escoamento, a diferentes distâncias em relação à saída do jato sintético. As distâncias escolhidas foram de 50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm e estão relacionadas diretamente com a altura do duto de saída do jato sintético, que está identificado como  $H_x$  e com valor de 5 mm. Portanto, cada 50 mm de distância corresponde a  $10H_x$ .

Outra alteração em relação ao estudo de Woyciekoski (2013), refere-se à forma de aplicação do sinal senoidal ao alto-falante. Neste experimento, foi adicionado um amplificador entre o gerador de sinais e o alto-falante, o que ocasionou o chamado casamento de impedâncias e utilizando a potência de  $30 W_{rms}$  do alto-falante. O amplificador neste caso funciona como uma interface entre a saída de impedância  $50 \Omega$  do gerador de sinais e a impedância de  $4 \Omega$  do alto-falante utilizado com membrana no gerador de jatos sintéticos.

Este procedimento, aliado à montagem da bancada experimental, resultou em maiores velocidades médias do jato em relação a Woyciekoski (2013). Woyciekoski (2013) obteve velocidades máximas de 3 m/s enquanto que, na bancada experimental deste estudo, foram obtidas velocidades próximas a 10 m/s, o que apresentou impacto positivo sobre a taxa de arrefecimento do elemento de aquecimento.

## 5.1 VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DO FLUIDO

Para caracterizar o escoamento do fluido de arrefecimento, foram verificadas inicialmente as velocidades do fluido para diferentes configurações de funcionamento do atuador de jato sintético, e também dos *coolers* que serão comparados posteriormente.

Foram verificadas, através da utilização de anemômetro portátil de fio quente, a velocidade do jato sintético para diferentes configurações de sinal senoidal aplicado ao alto-falante, mantendo amplitude fixa de modo a utilizar potência de  $20 W_{rms}$  e variando o valor de frequência de oscilação da membrana. As velocidades de escoamento do fluido nas verificações realizadas são apresentadas na Fig. 5.1 a Fig. 5.6 em relação a frequência de pulsação e distância entre o ponto de saída do jato sintético e o ponto de medição. As figuras mostram que para todas as frequências de pulsação, as velocidades mais altas foram atingidas à distância mais próxima ao ponto de saída do jato, nesse caso, correspondendo a 50 mm ou  $10H_x$ . As figuras também mostram a ocorrência de um aumento gradual na velocidade máxima do jato sintético com um aumento da potência desenvolvida pelo alto-falante até  $20 W_{rms}$ . A partir deste valor limite, aumentos da potência do alto-falante não resultaram em velocidades maiores do jato sintético. Senso assim, uma potência de  $20 W_{rms}$  foi escolhida para o acionamento do alto-

falante em testes subsequentes de resfriamento. As figuras também indicam que a frequência de ressonância da bancada de teste se encontra entre 50 Hz e 60 Hz para potências no alto-falante de até  $10 W_{rms}$ . Para potências de alto-falante acima de  $10 W_{rms}$ , observa-se uma faixa de frequências entre 40 Hz a 90 Hz onde o jato possui valores elevados de velocidade. Sendo assim, uma frequência de 60 Hz foi considerada como o valor ótimo de operação do gerador.

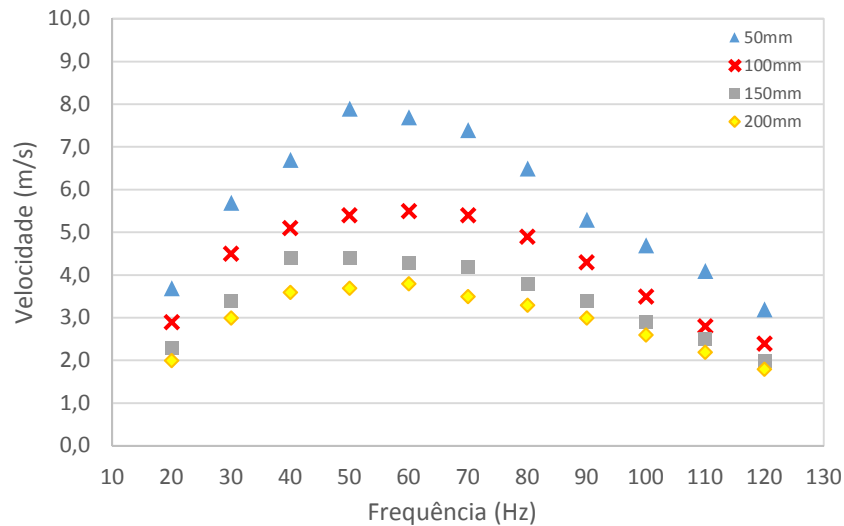


Figura 5.1 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $5 W_{rms}$ .

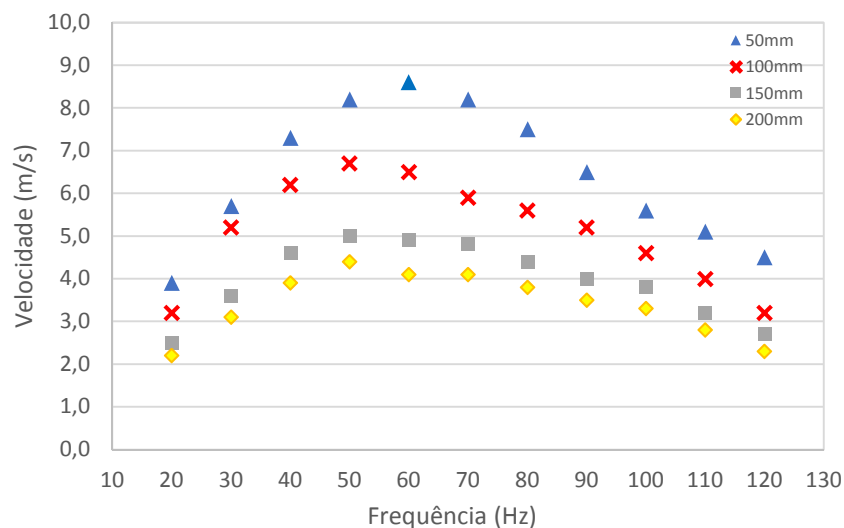


Figura 5.2 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $10 W_{rms}$ .

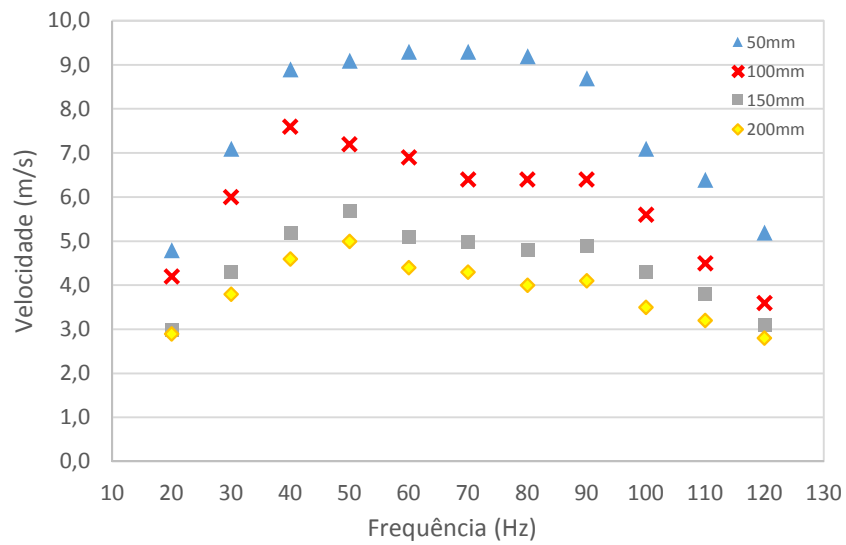


Figura 5.3 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $15 W_{rms}$ .

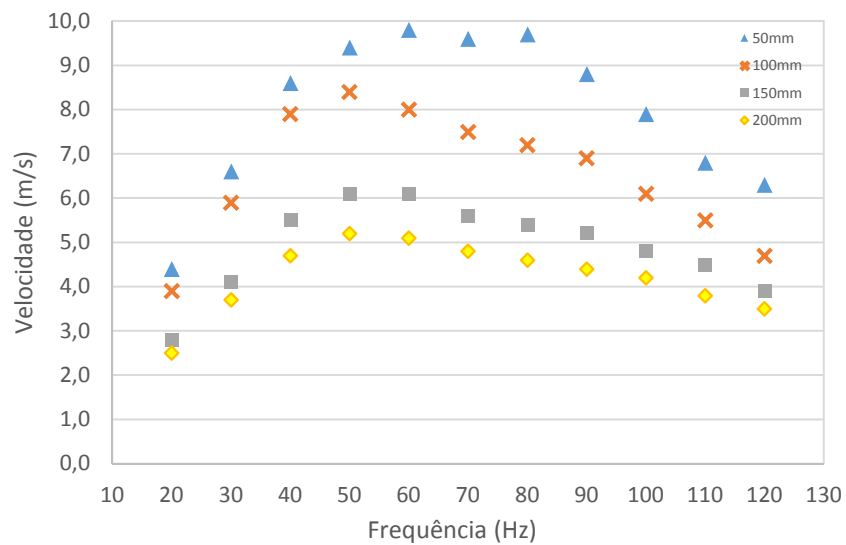


Figura 5.4 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $20 W_{rms}$ .

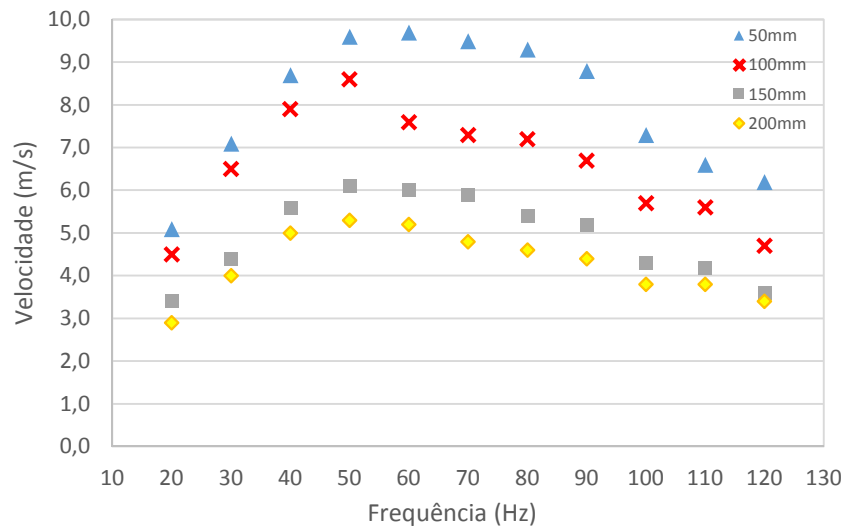


Figura 5.5 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $25 W_{rms}$ .

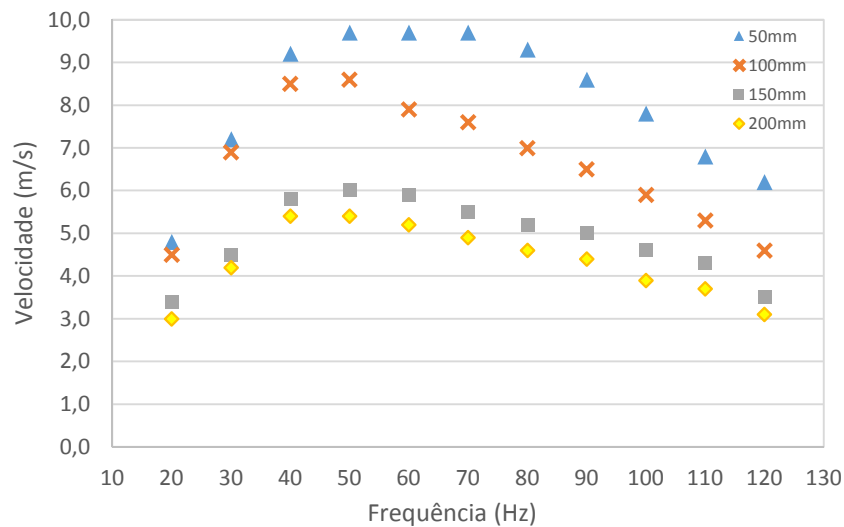


Figura 5.6 – Velocidade média do jato ao longo do duto de escoamento, para diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato, em função da frequência e para potência do alto-falante de  $30 W_{rms}$ .

A relação entre os números de Strouhal ( $St$ ) e Reynolds ( $Re$ ), é apresentada na Fig. 5.7, e mostra as diversas características que influenciam no escoamento do fluido em um duto. Conforme a definição da Eq. (3.5), o número de Strouhal relaciona a geometria do duto, a frequência de oscilação da membrana e a velocidade de escoamento do fluido, enquanto que o número de Reynolds (Eq. (3.3)) determina o regime de escoamento. São utilizados os valores de velocidade do jato e frequência de oscilação a uma potência do alto-falante de  $20 W_{rms}$ .

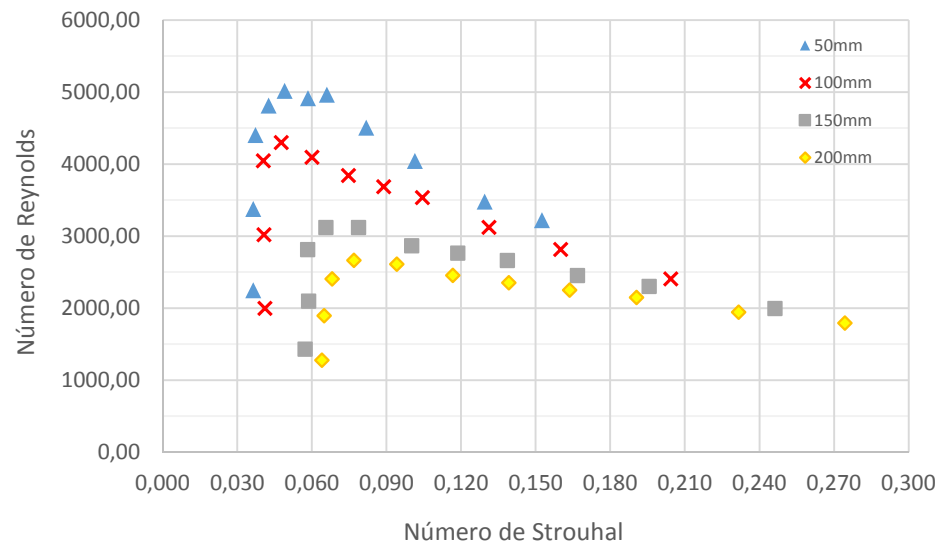


Figura 5.7 – Relação entre os números de Reynolds e Strouhal do jato ao longo do duto de escoamento, a diferentes distâncias a partir do orifício de saída do jato em função da frequência, para o alto-falante desenvolvendo  $20 W_{rms}$ .

Na Tab. 5.1 são apresentados os números de Reynolds para cada uma das distâncias do ponto de medição e frequência de oscilação do alto-falante desenvolvendo à potência de  $20 W_{rms}$ .

Tabela 5.1 – Valores de número de Reynolds para configuração de escoamento de fluido do jato com alto falante na potência de  $20 W_{rms}$ .

| Frequência | 50 mm   | 100 mm  | 150 mm  | 200 mm  |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 20 Hz      | 2254,02 | 1997,88 | 1434,38 | 1280,69 |
| 30 Hz      | 3381,03 | 3022,43 | 2100,34 | 1895,42 |
| 40 Hz      | 4405,58 | 4046,99 | 2817,52 | 2407,70 |
| 50 Hz      | 4815,40 | 4303,13 | 3124,89 | 2663,84 |
| 60 Hz      | 5020,31 | 4098,22 | 3124,89 | 2612,61 |
| 70 Hz      | 4917,86 | 3842,08 | 2868,75 | 2458,93 |
| 80 Hz      | 4969,09 | 3688,39 | 2766,30 | 2356,47 |
| 90 Hz      | 4508,04 | 3534,71 | 2663,84 | 2254,02 |
| 100 Hz     | 4046,99 | 3124,89 | 2458,93 | 2151,56 |
| 110 Hz     | 3483,48 | 2817,52 | 2305,25 | 1946,65 |
| 120 Hz     | 3227,34 | 2407,70 | 1997,88 | 1792,97 |

Na Tab. 5.2 são apresentados utilizados os números de Strouhal para cada uma das distâncias do ponto de medição e frequência de oscilação do alto-falante desenvolvendo à potência de  $20 W_{rms}$ .

Tabela 5.2 – Valores de número de Strouhal para configuração de escoamento de fluido do jato com alto-falante na potência de  $20 W_{rms}$ .

| <b>Frequência</b> | <b>50 mm</b> | <b>100 mm</b> | <b>150 mm</b> | <b>200 mm</b> |
|-------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 20 Hz             | 0,036        | 0,041         | 0,057         | 0,064         |
| 30 Hz             | 0,036        | 0,041         | 0,059         | 0,065         |
| 40 Hz             | 0,037        | 0,041         | 0,058         | 0,068         |
| 50 Hz             | 0,043        | 0,048         | 0,066         | 0,077         |
| 60 Hz             | 0,049        | 0,060         | 0,079         | 0,094         |
| 70 Hz             | 0,058        | 0,075         | 0,100         | 0,117         |
| 80 Hz             | 0,066        | 0,089         | 0,119         | 0,139         |
| 90 Hz             | 0,082        | 0,104         | 0,138         | 0,164         |
| 100 Hz            | 0,101        | 0,131         | 0,167         | 0,190         |
| 110 Hz            | 0,129        | 0,160         | 0,196         | 0,232         |
| 120 Hz            | 0,152        | 0,204         | 0,246         | 0,274         |

## 5.2 RESFRIAMENTO DE ELEMENTO AQUECEDOR MANTIDO A POTÊNCIA CONSTANTE E MONITORANDO A TEMPERATURA

### 5.2.1 Procedimento de Teste

Neste método de verificação de resfriamento, é ajustado manualmente uma potência de 5 W no elemento de aquecimento através da aplicação de uma DDP (diferença de potencial) no resistor cerâmico, que por apresentar uma resistência elétrica, ocasiona a circulação de uma determinada corrente elétrica que gera a energia térmica transferida por condução para o elemento de aquecimento da bancada experimental. Com o resistor cerâmico utilizado, com valor comercial de  $47 \Omega$  e 10 W, e que em funcionamento na faixa de temperatura utilizada na bancada experimental apresenta  $49 \Omega$  de resistência, se faz necessária uma diferença de potencial de 15,66 V e corrente de 320 mA para atingir os 5 W necessários. Para estes valores



utilizados, após algum tempo de aquecimento, ocorre a estabilização da temperatura no elemento de aquecimento sem a presença de jato sintético em aproximadamente 93,2 °C.

Ocorrendo a estabilização da temperatura no elemento de aquecimento, mantida potência de 5 W no resistor cerâmico de aquecimento, é acionado o jato sintético com o alto-falante na potência de  $20 W_{rms}$ , aplicando onda senoidal de amplitude  $10,64 V_p$  ( $7,52 V_{rms}$ ) e frequências de 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 75 Hz, 90 Hz e 120 Hz. Para cada frequência, o elemento de aquecimento foi posicionado em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de ejeção do jato sintético, obtendo diminuição da temperatura no elemento de aquecimento para cada configuração, o que é apresentado na Fig. 5.8. Conforme mostra a figura, a menor temperatura é atingida à frequência de 60 Hz e com o elemento de aquecimento na posição mais próxima do orifício de saída do jato. Este resultado está em concordância com os resultados numéricos de Munhoz (2012), onde foi observado um maior desempenho térmico com o elemento de aquecimento mais próximo do jato.

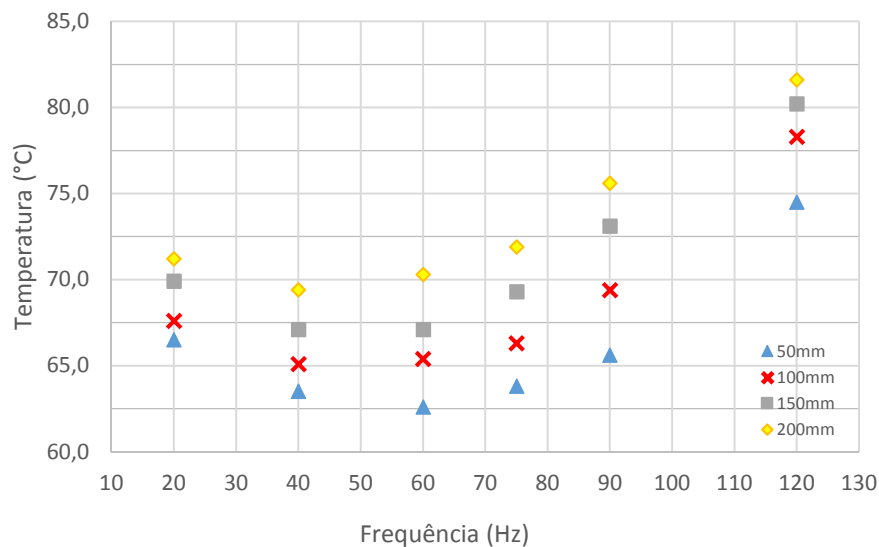


Figura 5.8 – Temperatura mínima atingida para uma potência de aquecimento de 5 W de acordo com a frequência e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.

Analisando a troca térmica envolvida neste processo, é determinado o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), obtida através da Eq. 3.1, e o número de Nusselt ( $Nu$ ) através da Eq. 3.8. No caso deste experimento, a superfície é o elemento de aquecimento e o fluido circundante é o ar a temperatura de 25 °C.

### 5.2.2 Resultados de Resfriamento

Os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção, mantendo potência constante de 5 W e monitorando a temperatura no elemento de aquecimento, são apresentados na Tab. 5.3 para cada uma das configurações de distância do elemento e frequência de oscilação do jato.

Tabela 5.3 – Valores do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ), em  $W/(m^2.K)$ , para 5 W de aquecimento de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.

| <b>Distância em relação ao jato</b> | <b>Frequência 20 Hz</b> | <b>Frequência 40 Hz</b> | <b>Frequência 60 Hz</b> | <b>Frequência 75 Hz</b> | <b>Frequência 90 Hz</b> | <b>Frequência 120 Hz</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 50 mm                               | 133,55                  | 143,18                  | 144,30                  | 139,24                  | 137,17                  | 112,69                   |
| 100 mm                              | 131,03                  | 136,17                  | 138,54                  | 134,52                  | 125,41                  | 103,07                   |
| 150 mm                              | 122,64                  | 133,23                  | 135,83                  | 125,41                  | 115,02                  | 101,01                   |
| 200 mm                              | 120,25                  | 122,64                  | 130,11                  | 118,71                  | 110,67                  | 98,15                    |

Os valores de número de Nusselt, mantendo potência constante de 5 W e monitorando a temperatura no elemento de aquecimento, são apresentados na Tab. 5.4 para cada uma das configurações de distância do elemento em relação ao orifício do jato e frequência de oscilação.

Tabela 5.4 – Valores de número de Nusselt para 5 W de aquecimento de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.

| <b>Distância em relação ao jato</b> | <b>Frequência 20 Hz</b> | <b>Frequência 40 Hz</b> | <b>Frequência 60 Hz</b> | <b>Frequência 75 Hz</b> | <b>Frequência 90 Hz</b> | <b>Frequência 120 Hz</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 50 mm                               | 278,22                  | 298,30                  | 300,62                  | 290,08                  | 285,78                  | 234,77                   |
| 100 mm                              | 272,97                  | 283,68                  | 288,63                  | 280,24                  | 261,27                  | 214,73                   |
| 150 mm                              | 255,50                  | 277,56                  | 282,98                  | 261,27                  | 239,63                  | 210,44                   |
| 200 mm                              | 250,52                  | 255,50                  | 271,06                  | 247,31                  | 230,56                  | 204,49                   |

Na Tab. 5.4 é possível verificar que o maior valor de número de Nusselt ocorreu na frequência de 60 Hz e com o elemento de aquecimento na posição mais próxima ao orifício de saída do jato sintético. Isto se deve ao fato de ser o local onde ocorre a maior turbulência e velocidade de escoamento do fluido, com número de Reynolds de 5020,31 e número de Strouhal de 0,306.

Na Fig. 5.9 é apresentada a relação do número de Nusselt para cada uma das frequências de oscilação utilizadas no alto-falante, com o elemento de aquecimento em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato sintético.

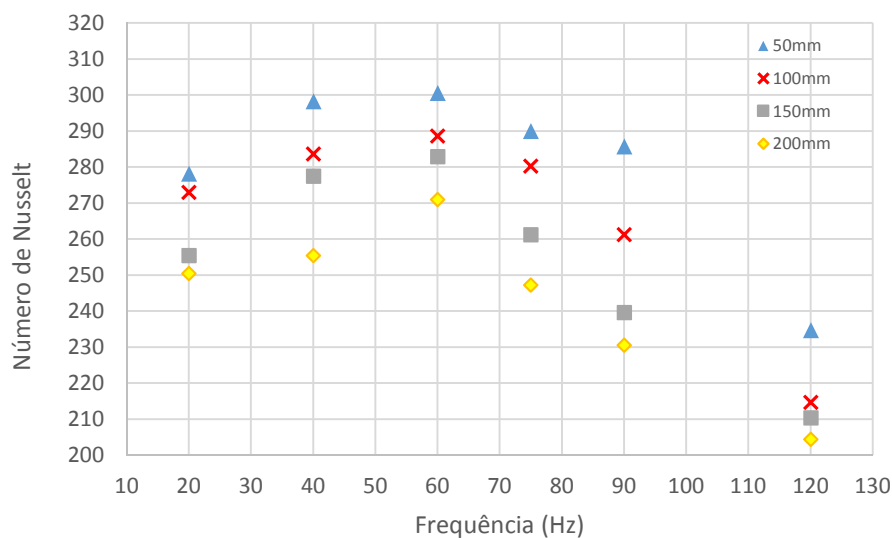


Figura 5.9 – Variação do número de Nusselt em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato.

Na Fig. 5.10 é apresentada a relação do coeficiente de transferência de calor por convecção para cada uma das frequências de oscilação utilizadas no alto-falante, com o elemento de aquecimento em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato sintético.

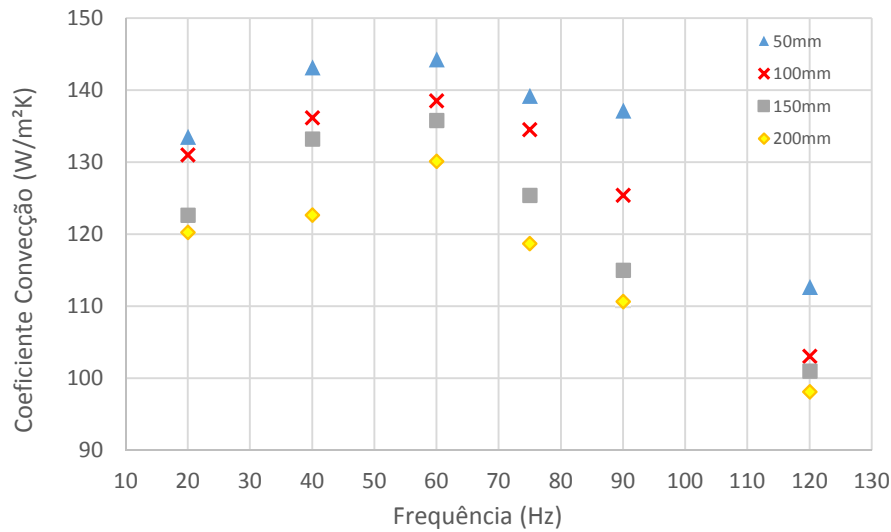


Figura 5.10 – Variação do coeficiente de convecção em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato.

### 5.3 RESFRIAMENTO DE ELEMENTO AQUECEDOR MANTIDO A TEMPERATURA CONSTANTE E MONITORANDO A POTÊNCIA DISSIPADA

#### 5.3.1 Procedimentos de Teste

Neste método de verificação de resfriamento, é ajustado de maneira manual uma diferença de potencial ao resistor cerâmico do elemento de aquecimento, que então gera um aquecimento através da circulação de uma corrente elétrica para atingir uma temperatura alvo de 80 °C. O resistor cerâmico com valor comercial de 47 Ω e 10 W, tem funcionamento na faixa de temperatura utilizada na bancada experimental e apresenta 49 Ω de resistência real. Para atingir a temperatura de 80 °C estipulada para o elemento de aquecimento neste método sem o escoamento de fluido, se faz necessária uma potência de aproximadamente 3,968 W. Esta potência é obtida com a aplicação de uma diferença de potencial de 13,94 V e corrente elétrica de aproximadamente 285 mA no resistor cerâmico do elemento de aquecimento.

Ocorrendo a estabilização da temperatura em 80 °C no elemento de aquecimento, é mantida a diferença de potencial aplicada ao resistor cerâmico do elemento e então acionado escoamento de jato sintético com potência do alto-falante em 20  $W_{rms}$ , aplicando onda senoidal de amplitude 10,64  $V_p$  (7,52  $V_{rms}$ ) e frequências de 20 Hz, 60 Hz, 80 Hz e 120 Hz, posicionando o elemento de aquecimento em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de ejeção do jato sintético. Com o escoamento do jato pelo duto da bancada experimental, será percebida a

diminuição gradual da temperatura no elemento de aquecimento, sendo mostrado na Fig. 5.11 os valores mínimos de temperatura atingidos para cada uma das configurações de jato e distância entre o orifício de saída do jato e o elemento.

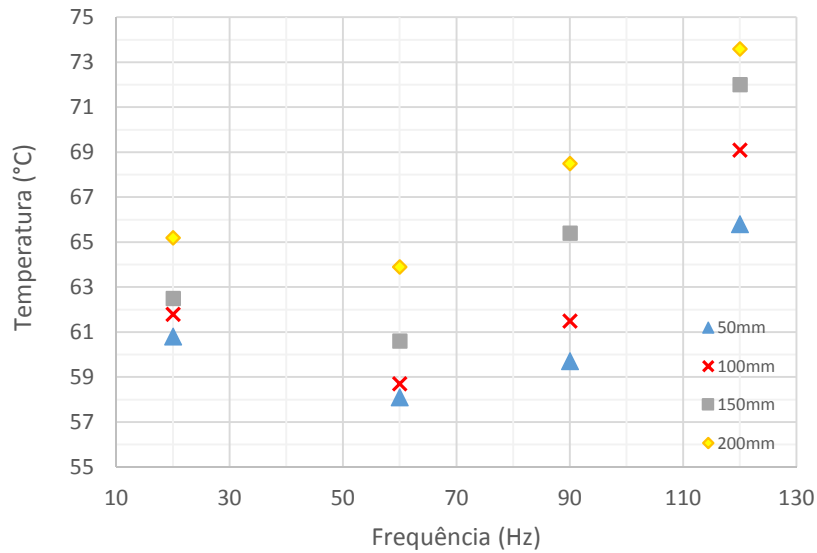


Figura 5.11 – Temperatura mínima atingida ao ligar o jato, de acordo com a frequência e posição do elemento de aquecimento, a partir de uma temperatura inicial de 80 °C.

Quando ocorrer a estabilização da temperatura, se inicia processo de aumento da potência no resistor cerâmico e conseqüentemente no elemento de aquecimento até se obter novamente a temperatura de 80 °C inicialmente obtida sem o escoamento de fluido. Esta recuperação de temperatura com maior troca térmica devido o escoamento do jato pelo duto tangencial ao elemento de aquecimento permite uma maior dissipação de potência pelo resistor. Este procedimento foi repetido para o elemento de aquecimento posicionado em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de ejeção do jato sintético. Quanto mais próximo do orifício do jato, maior a potência que poderá ser dissipada pelo elemento de aquecimento, conforme mostrado na Fig. 5.12.

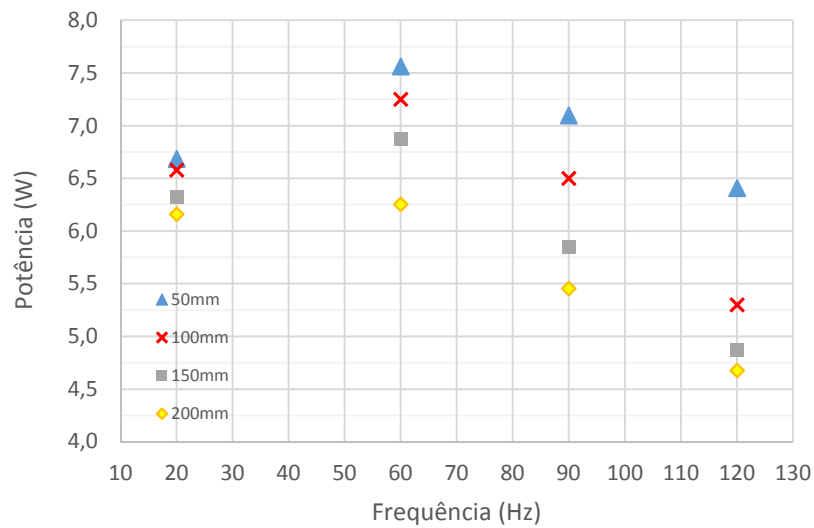


Figura 5.12 – Potência necessária para manter o elemento de aquecimento a 80 °C de acordo com a frequência do jato e posição do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato.

### 5.3.2 Resultados de Resfriamento

Os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), mantendo temperatura constante e monitorando a potência no elemento de aquecimento, são apresentados na Tab. 5.5 para cada uma das configurações de distância do elemento e frequência de oscilação do jato.

Tabela 5.5 – Valores do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), em  $W/(m^2.K)$ , a temperatura constante e monitorando a potência no elemento de aquecimento, de acordo com a frequência do jato e posição em relação ao orifício de saída do jato.

| Distância em relação ao jato | Frequência 20 Hz | Frequência 60 Hz | Frequência 90 Hz | Frequência 120 Hz |
|------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 50 mm                        | 135,05           | 152,79           | 143,41           | 129,49            |
| 100 mm                       | 132,89           | 146,51           | 131,33           | 103,94            |
| 150 mm                       | 130,20           | 139,31           | 114,71           | 98,44             |
| 200 mm                       | 124,44           | 126,32           | 110,20           | 94,52             |

Os valores de número de Nusselt, mantendo temperatura constante em 80 °C no elemento de aquecimento e monitorando a potência, são apresentados na Tab. 5.6 para cada uma das configurações de distância do elemento e frequência de oscilação jato.

Tabela 5.6 – Valores do número de Nusselt para temperatura constante no elemento de aquecimento e monitorando a potência.

| <b>Distância em relação ao jato</b> | <b>Frequência 20 Hz</b> | <b>Frequência 60 Hz</b> | <b>Frequência 90 Hz</b> | <b>Frequência 120 Hz</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 50 mm                               | 281,36                  | 318,31                  | 298,78                  | 269,78                   |
| 100 mm                              | 276,85                  | 305,22                  | 273,61                  | 216,54                   |
| 150 mm                              | 271,25                  | 290,24                  | 238,97                  | 205,09                   |
| 200 mm                              | 259,26                  | 263,17                  | 229,59                  | 196,93                   |

Analisando a Tab. 5.6 é possível verificar que o maior valor de número de Nusselt ocorreu na frequência de 60 Hz e com o elemento de aquecimento na posição mais próxima em relação ao orifício de saída do jato sintético. Isto se deve ao fato de ser o local onde ocorre a maior turbulência e velocidade de escoamento do fluido, com número de Reynolds de 5020,31 e número de Strouhal de 0,306.

Na Fig. 5.13 é apresentado o número de Nusselt para cada uma das frequências de oscilação no alto-falante funcionando como membrana, com o elemento de aquecimento em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato sintético.

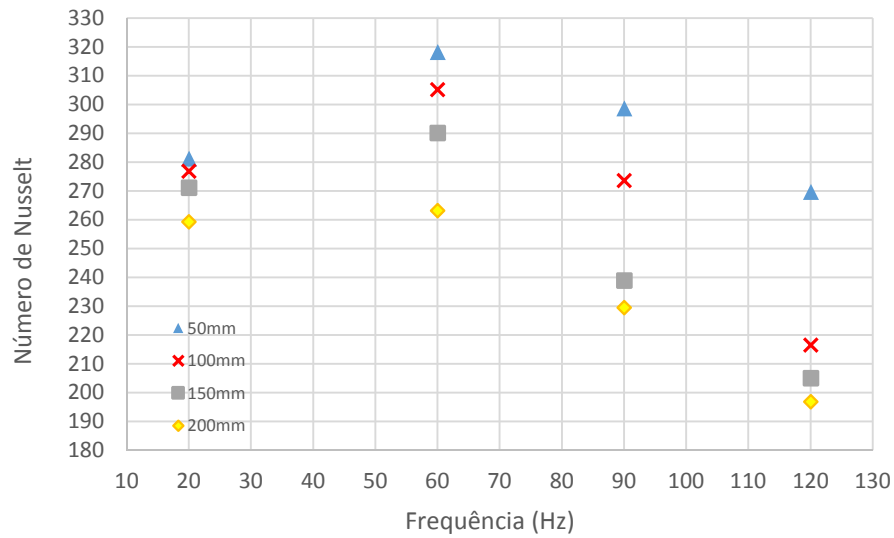


Figura 5.13 – Número de Nusselt em relação à frequência de oscilação, para temperatura constante no elemento de aquecimento em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato.

Na Fig. 5.14 é apresentada a relação do coeficiente de convecção para cada uma das frequências de oscilação utilizadas no alto-falante, com o elemento de aquecimento em quatro diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato sintético.

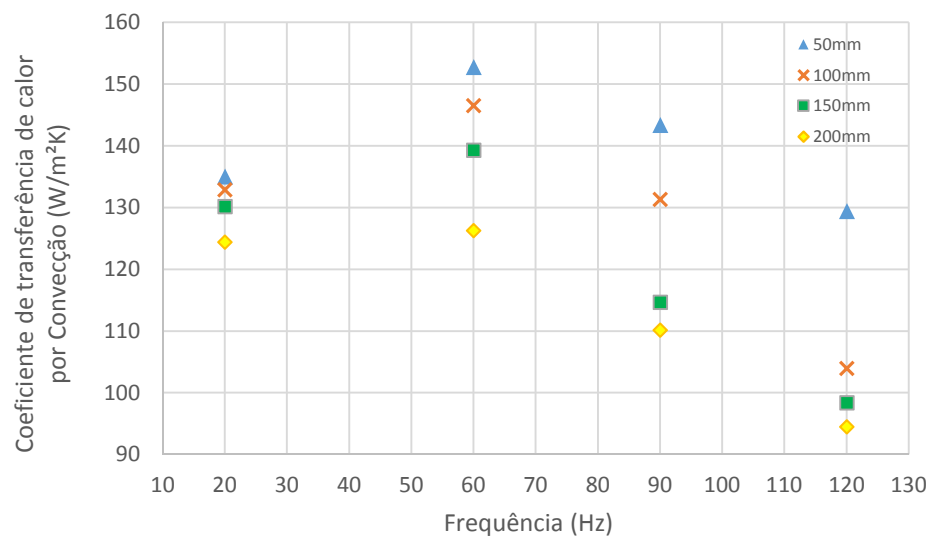


Figura 5.14 – Gráfico do coeficiente de convecção para temperatura constante no elemento de aquecimento em relação à frequência de oscilação em diferentes distâncias em relação ao orifício de saída do jato.



Para as configurações descritas na seção 5.3.1, os valores de potência necessária no resistor de aquecimento para manter a temperatura do elemento a 80 °C são mostrados na Fig. 5.8. Semelhante aos resultados nesta seção 5.2.2, ao analisar o que é apresentado na Fig. 5.11 e Fig. 5.11, verifica-se que a maior potência de aquecimento dissipada ocorreu à frequência de 60 Hz e com o elemento de aquecimento na posição mais próxima do orifício de saída do jato sintético.

Cabe salientar que, para todos os resultados obtidos, as características de amplitude e frequências da onda senoidal aplicada ao alto-falante foram definidas pelas medições de velocidade do escoamento do fluido, realizadas previamente utilizando o anemômetro de fio quente e mencionadas anteriormente.

Para o cálculo da potência dissipada é considerado o valor da diferença de potencial aplicada no resistor cerâmico de aquecimento, pois o valor ôhmico do resistor cerâmico é estável dentro da faixa de temperatura utilizado no experimento. Sendo assim, para a obtenção da potência dissipada é utilizada equação baseada na Lei de Ohm conforme a Eq. 5.5.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5.5)$$

onde  $V$  é a diferença de potencial aplicada ao resistor de aquecimento, em volts, e  $R$  é o valor fixo adotado para resistência ôhmica do resistor cerâmico de aquecimento, definida após verificação experimental com o resistor submetido a funcionamento dentro da faixa de temperatura utilizada neste experimento.

#### 5.4 COMPARAÇÕES ENTRE RESFRIAMENTO DE JATO SINTÉTICO COM *COOLER* CONVENCIONAL

Outro procedimento experimental realizado é a comparação, utilizando a mesma bancada experimental, entre os resultados obtidos com o arrefecimento do elemento de aquecimento utilizando jato sintético tangencial e o uso de ventiladores convencionais, conhecidos por *cooler* e muito utilizado em arrefecimento eletrônico. Para realizar este comparativo, foram examinados três tamanhos de *coolers* em funcionamento normal com fornecimento de alimentação elétrica compatível com o estipulado pelo fabricante.

Tabela 5.7 – Dados técnicos dos *coolers* utilizados na comparação.

| Cooler  | Fabricante | Medidas externas (mm) | Diâmetro da Hélice (mm) | RPM  | Fluxo de Ar - CFM (ft <sup>3</sup> /min) | Fluxo de Ar (m <sup>3</sup> /min) | Potência (W) |
|---------|------------|-----------------------|-------------------------|------|--|-----------------------------------|--------------|
| Pequeno | Golden     | 35x35x7               | 32                      | 5500 | 4,9                                      | 0,139                             | 1,0          |
| Médio   | MXT        | 40x40x10              | 36                      | 5000 | 5,5                                      | 0,156                             | 1,5          |
| Grande  | Loud       | 60x60x20              | 53                      | 4500 | 18,2                                     | 0,345                             | 2,0          |

Referente aos dados técnicos obtidos em *datasheets* disponibilizados pelos fabricantes dos *coolers* utilizados, os mais importantes são apresentados na Tab. 5.7. Mas é necessário mencionar algumas informações sobressalentes e que são fundamentais para análise do funcionamento destes dispositivos no resfriamento em que são aplicados e não foram informados inicialmente. O principal dado técnico não informado e que precisa ser considerado para analisar a eficiência de um *cooler* é o fluxo de ar, estipulado pelos fabricantes em pés cúbicos por minuto (ft<sup>3</sup>/min): quanto maior o valor, melhor o desempenho no resfriamento, e este valor depende também da aerodinâmica das pás e materiais utilizados na fabricação do *cooler*. Outro valor não informado é o da vida útil do *cooler*, que varia de acordo com o material utilizado na fabricação e o ambiente a que está exposto. Baseado em dados operacionais de outros modelos, pode-se estimar que os *coolers* utilizados no experimento possuem uma vida útil de pelo menos 20.000 horas.

Quanto à possibilidade de se obter fluxo de ar com valores mais elevados com *coolers*, os fabricantes mencionam que é possível elevar a rotação através de incremento na tensão de alimentação até o limite de 10 % acima do valor nominal, o que não traria aumento considerável do fluxo de ar e reduziria consideravelmente a vida útil destes dispositivos. Informam ainda que alterações do fluxo de ar serão praticamente imperceptíveis com este incremento limitado, e excedendo este valor a vida útil é reduzida drasticamente. Aplicando este acréscimo permitido pelos fabricantes aos *coolers* em funcionamento e utilizados no experimento, realmente não se obteve significativo retorno nos valores do fluxo de ar, optando-se então em utilizar os valores nominais fornecidos pelos fabricantes.

Na Fig. 5.15 é possível visualizar os *coolers* utilizados para comparação frente ao uso de jatos sintéticos, já com os adaptadores convergentes de acrílico para acoplamento ao duto de escoamento da bancada experimental, que possui 20 mm de largura.

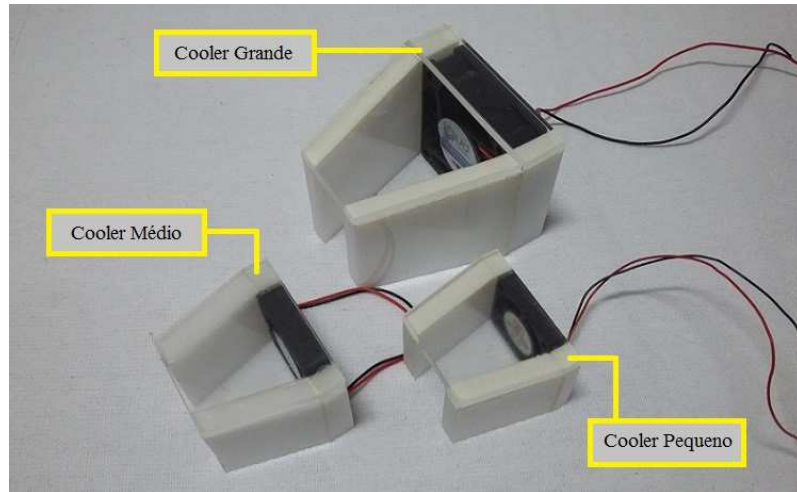


Figura 5.15 – *Coolers* utilizados em comparação ao jato sintético, com adaptadores para o duto da bancada experimental.

Para obter velocidades de escoamento de ar e capacidade de arrefecimento em comparação ao jato sintético, estes *coolers* foram posicionados na bancada em uma posição equivalente ao orifício de saída do alto-falante. Desta forma, o ponto de saída do adaptador convergente é próximo a saída do duto de jato sintético. Os dados experimentais de arrefecimento do elemento de aquecimento, seja com jato sintético ou com qualquer um dos *coolers* convencionais, são realizadas individualmente e em momentos diferentes; por este motivo são intercambiáveis e ocupam o mesmo local na bancada experimental. A Fig. 5.16 apresenta o *cooler* convencional de maior tamanho utilizado no experimento adaptado à bancada experimental. Na figura é possível visualizar também, dois dos furos localizados na tampa superior do duto onde é inserido o sensor do anemômetro de fio quente para medir a velocidade de escoamento do fluido no interior do duto.



Figura 5.16 – *Cooler* de 53 mm acoplado ao duto da bancada experimental.

### 5.4.1 Velocidades do fluido com utilização de *coolers* convencionais

Para caracterizar a capacidade de arrefecimento de *cooler* convencionais, foram verificadas inicialmente as velocidades do fluido para os três diferentes tamanhos de *cooler*. A Fig. 5.17 apresenta as velocidades médias do deslocamento de ar de cada *cooler*, obtidas através de medições com anemômetro de fio quente para diversas distâncias e utilizando como ponto de referência o local do posicionamento do orifício de saída do jato nos testes anteriores.

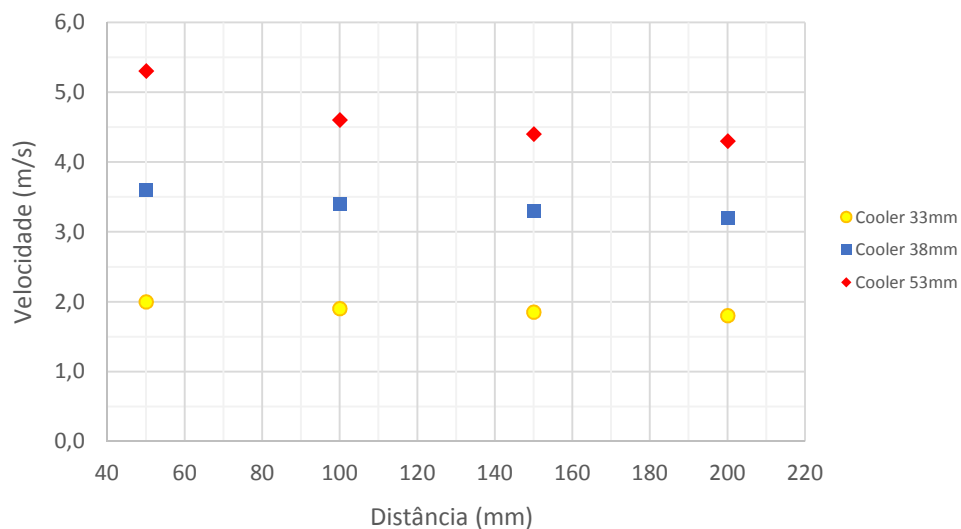


Figura 5.17 – Variação da velocidade do ar gerado pelos *coolers* ao longo do canal

Relacionado aos dados de velocidade apresentados na Fig. 5.17, os valores apresentados na Tab. 5.8 são valores de número de Reynolds, baseados no diâmetro hidráulico do canal, para cada um dos *coolers* testados.

Tabela 5.8 – Valores de número de Reynolds para escoamento do fluido com a configurações de *coolers* tradicionais utilizados na comparação.

| <i>Cooler</i> | 50 mm    | 100 mm  | 150 mm  | 200 mm  |
|---------------|----------|---------|---------|---------|
| 33 mm         | 3933,36  | 3736,69 | 3638,36 | 3540,02 |
| 38 mm         | 7080,04  | 6686,71 | 6490,04 | 6293,37 |
| 53 mm         | 10423,40 | 9046,72 | 8653,39 | 8456,72 |

#### 5.4.2 Procedimentos de teste com *cooler* convencional

Neste método de verificação de resfriamento utilizando *coolers* convencionais, são realizados procedimentos equivalentes aos descritos no item 5.3.1 quando foi utilizado o jato sintético. O primeiro procedimento consiste na aplicação de um valor constante de potencial ao resistor cerâmico do elemento que resulta em uma temperatura inicial de 80 °C sem arrefecimento. Acionando-se cada *cooler* na sua tensão nominal, produz-se um escoamento pelo duto da bancada que resulta em uma diminuição gradual da temperatura do elemento de aquecimento, até os valores mínimos mostrado na Fig. 5.18 para cada posição do elemento de aquecimento.

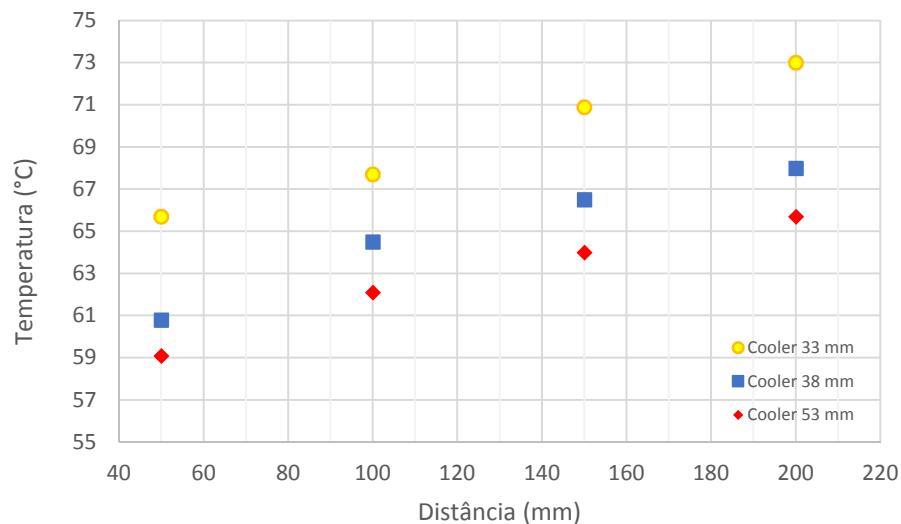


Figura 5.18 – Temperatura mínima atingida no elemento de aquecimento, por cada *coolers* convencionais alimentado à sua tensão nominal.

O segundo procedimento consiste na medição do valor de potência necessário no elemento de aquecimento com os *coolers* em funcionamento nas suas tensões nominais para se obter novamente a temperatura de 80 °C inicialmente obtida sem o escoamento de fluido. Os resultados são mostrados na Fig. 5.19 para cada posição do elemento de aquecimento.

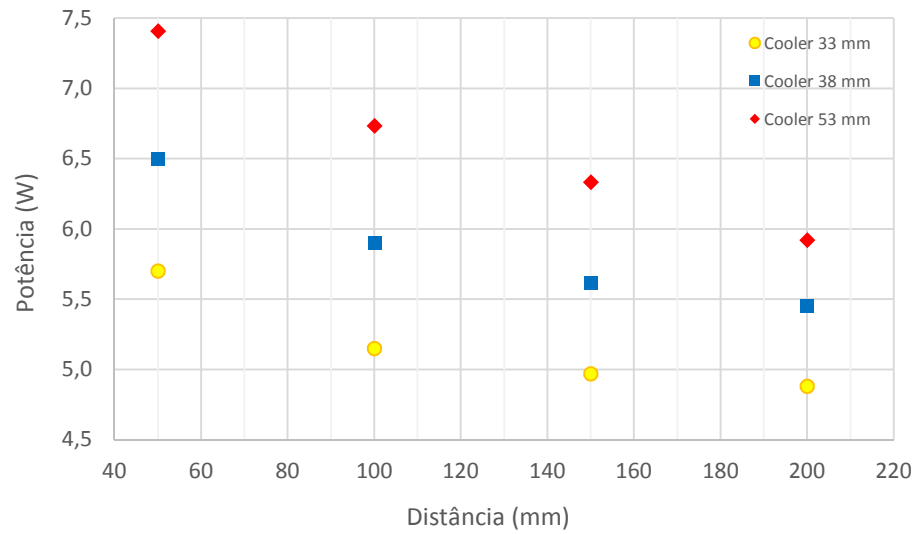


Figura 5.19 – Potência necessária para manter o elemento de aquecimento a 80°C com *coolers* convencionais alimentado à sua tensão nominal.

#### 5.4.3 Verificação da vazão mássica no duto de escoamento

A vazão mássica ( $\dot{m}$ ) é utilizada com o objetivo de realizar a comparação entre o escoamento do fluido no duto utilizando jatos sintéticos e *coolers* convencionais, sendo calculada de acordo com a Eq. 5.6.

$$\dot{m} = \rho A v \quad (5.6)$$

onde  $\rho$  é a densidade ou massa específica do fluido e  $A$  é a área da seção transversal do duto de escoamento e  $v$  é a velocidade média do escoamento do fluido no duto. Para a determinação de  $v$ , a velocidade do escoamento foi medida à várias alturas com a utilização do anemômetro de fio quente na extremidade de saída do duto, conforme mostra a Fig. 5.20.



Figura 5.20 – Indicação do local onde foi disposto o anemômetro de fio quente.

Como as dimensões da seção transversal do duto são de 20 mm e altura de 50 mm, as medições de velocidade do fluido foram realizadas no centro do duto de escoamento em intervalos de 10 mm de altura. Não foram realizadas medições nas alturas iniciais e finais (0 mm e 50 mm) e as suas respectivas velocidades foram assumidas como zero. Este procedimento foi realizado tanto para o jato sintético como para os *coolers* convencionais.

No escoamento de fluido gerado por jatos sintéticos com o atuador operando na frequência de 60 Hz e potência de 20  $W_{rms}$ , foi observada uma velocidade constante de aproximadamente 4 m/s da entre as alturas de 10 mm a 30 mm; e na altura de 40 mm é verificada uma velocidade de aproximadamente 3,6 m/s. Com isso, a Fig. 5.21 apresenta este perfil característico para o escoamento do jato sintético no duto da bancada experimental.

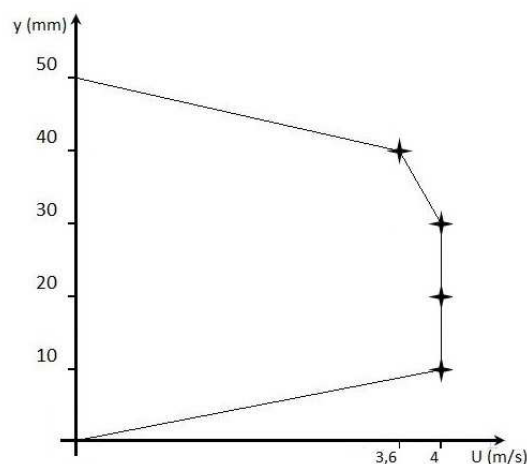


Figura 5.21 – Perfil de escoamento do fluido gerado por jato sintético a 60 Hz e 20  $W_{rms}$ .

Para o escoamento de fluido gerado pelos *coolers* funcionando sob condições nominais sugeridas pelos fabricantes, foi observado velocidade de ar constante em toda altura do duto, ocorrendo diferenciação de velocidade de acordo com o tamanho do *cooler* utilizado. As velocidades de escoamento do fluido são de 1,4 m/s, 2,6 m/s e 3,8 m/s para os *coolers* de 33, 38 e 53 mm respectivamente. Na Fig. 5.22 é possível verificar o perfil de escoamento característico do fluido utilizando o *cooler* maior de 53 mm, sendo que os demais *coolers* possuem o mesmo perfil de escoamento, porém com velocidades inferiores.

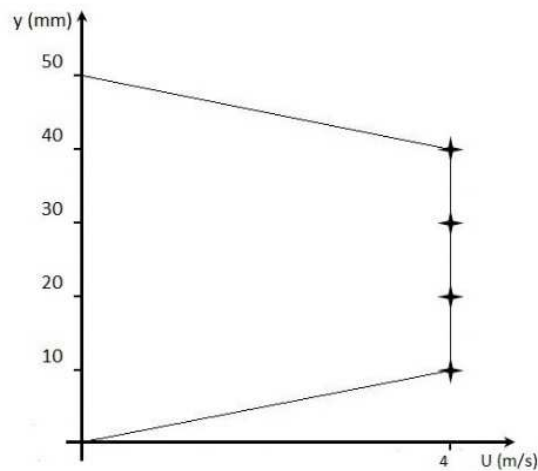


Figura 5.22 – Perfil de escoamento do fluido gerado por *cooler* convencional de 53 mm alimentado a sua tensão nominal.

Para obter velocidade média do escoamento do fluido no duto para cada caso, uma média de área foi utilizada assumindo-se que as velocidades medidas são constantes na direção transversal do duto. Este valor é aplicado à Eq. 5.6 para obter os seguintes valores de vazão mássica apresentados na Tabela 5.9

Tabela 5.9 – Valores de vazão mássica (em kg/s) para escoamento produzido pelo jato sintético a 60 Hz e  $20 W_{rms}$  e *coolers* tradicionais.

| <b>Dispositivo</b>  | <b>Vazão mássica (<math>\dot{m}</math>)</b> |
|---------------------|---|
| jato sintético      | 3,04  |
| <i>cooler</i> 33 mm | 1,2   |
| <i>cooler</i> 38 mm | 2,32  |
| <i>cooler</i> 53 mm | 3,2   |



#### 5.4.4 Análise comparativa do jato sintético e *coolers* convencionais

Os resultados da Tabela 5.9 indicam que a comparação entre o melhor desempenho do jato sintético somente pode ser realizado em relação ao *cooler* de 53 mm que desenvolveu uma vazão mássica mais próxima. Pode-se comparar a temperatura mínima atingida com o maior *cooler* de 53 mm de diâmetro, de acordo com a Fig. 5.18, e a temperatura mínima obtida com jatos sintéticos operando na frequência ótima de 60 Hz mostrados na Fig. 5.11. Para ambos os casos, a temperatura mínima foi encontrada à distância de 50 mm mas observa-se que as temperaturas obtidas pelo jato sintético são ligeiramente menores (57,8 °C) do que para o *cooler* de 53 mm de diâmetro (59 °C). Também pode-se comparar os níveis de potência do elemento de aquecimento entre o *cooler* de 53 mm de diâmetro, mostrado na Fig. 5.19 e o jato sintético operando na frequência ótima de 60 Hz, mostrado na Fig. 5.12. Novamente observa-se que a potência máxima permitida pelo jato sintético é ligeiramente superior (7,6 W) do que para o *cooler* (7,4 W). A semelhança dos resultados é resultado direto à proximidade dos valores de vazão mássica desenvolvidos mas deve-se levar em consideração as dimensões físicas de cada dispositivo: 8 mm de diâmetro hidráulico para o jato sintético e 53 mm de diâmetro de hélice do *cooler* convencional. Baseado neste fato, pode-se afirmar que o jato sintético é capaz de gerar um potencial de arrefecimento ligeiramente superior a um *cooler* convencional mas necessitando de apenas 15% do espaço exigido pelo *cooler*. Isso confirma a adequabilidade de jatos sintéticos para arrefecimento em componentes eletrônicos compactos ou em espaços reduzidos.

Por outro lado, em termos do consumo energético de cada sistema de arrefecimento, é consumido pelo o gerador de jato sintético um valor de  $20 W_{rms}$ . O *cooler* de 53 mm gera a mesma vazão mássica com a aplicação de tensão elétrica de 12V e corrente elétrica de 170mA, o que com a aplicação da Lei de Ohm ocasiona em uma potência de aproximadamente 2W. Isto desestimula em primeiro momento a utilização de jatos sintéticos devido ao consumo de energia superior a de um *cooler* convencional. Mas deve ser levado em consideração que o alto-falante selecionado para uso na bancada foi escolhido conforme a sua disponibilidade no mercado, não de acordo com níveis de consumo. É possível que um dispositivo oscilatório de menor escala física possa atingir níveis de consumo comparáveis a *coolers* convencionais. Adicionalmente é necessário ser considerado que o consumo pode vir a ser uma fator de escolha secundário em relação ao desempenho de resfriamento dos jatos sintéticos e à sua maior

confiabilidade por não apresentar possibilidade de defeito por acúmulo de sujeira ou travamento de partes mecânicas.

## 6 CONCLUSÕES

A necessidade de obtenção de novos e mais eficientes métodos de resfriamento eletrônico frente aos métodos tradicionais utilizados atualmente torna necessário o desenvolvimento de novas técnicas que sejam mais eficazes perante a alta taxa de aquecimento dos componentes eletrônicos com tamanhos menores, de maior potência e calor dissipados.

Com planejamento minucioso, o projeto desenvolvido em software SolidWorks obteve excelente acabamento no corte e montagem das peças acrílicas e metálicas necessárias para formar a bancada experimental, obtendo encaixes perfeitos e conseqüentemente resultados de resfriamento. O sistema eletrônico desenvolvido foi de suma importância no controle do funcionamento e na coleta dos resultados, com confiabilidade nos dados e permitindo realizar os testes de forma portátil, sem necessidade de diversos equipamentos auxiliares para o controle e armazenamento de dados.

Referente ao coeficiente de calor por convecção, fica evidente e é mostrado através de gráficos que nos diversos procedimentos experimentais há uma frequência ótima onde se percebe valores mais elevados do coeficiente de convecção quanto do número de Nusselt. Estes valores se alteram e têm características diferentes de acordo com as características da membrana do gerador de jatos e também de acordo com o formato do orifício de saída do jato e do duto de escoamento utilizados. No caso deste estudo, uma frequência ótima foi determinada como 60 Hz.

Os testes, realizados com temperatura e potência constantes, possibilitaram observar o resfriamento adequado de um elemento de aquecimento com comportamento similar ao aquecimento de um dispositivo eletrônico em funcionamento. Melhores desempenhos foram obtidos a uma frequência de pulsação de 60 Hz e na distância de posicionamento mais próxima do elemento de aquecimento em relação ao orifício de saída do jato. Para esta configuração, o teste para o elemento de aquecimento mantido a uma temperatura constante de 80 °C possibilitou a dissipação máxima de 7,5 W de potência, com um pico de coeficiente de convecção de 152,79 W/(m<sup>2</sup>.K) e número de Nusselt correspondente de 318,31. No caso de teste dissipando 5 W de potência constante no elemento de aquecimento, a temperatura mínima atingida foi de 62,5 °C (em relação aos 80 °C iniciais sem a presença do jato), com um pico de coeficiente de convecção de 144,30 W/(m<sup>2</sup>.K) e número de Nusselt correspondente de 300,62.

Na comparação do consumo de potência para a geração de fluido para resfriamento, entre os dispositivos convencionais do tipo *cooler* e os jatos sintéticos, é possível afirmar que em um primeiro comparativo se identifica uma situação desfavorável aos jatos sintéticos devido

ao consumo maior apresentado pelo alto-falante utilizado como membrana nesta bancada experimental. Isto pode ser justificado pelo fato de que neste experimento foi utilizado como membrana um alto-falante potência elevada em relação às dos *coolers* utilizados por estar disponível para utilização e ser o mesmo utilizado em outro procedimento experimental realizado, o que também já serviu como comparativo entre os experimentos desenvolvidos. Mas deve-se ressaltar que, na obtenção dos mesmos desempenhos de resfriamento, o jato sintético possuía apenas 8 mm de diâmetro hidráulico enquanto que o *cooler* convencional necessitou de um diâmetro de hélice de 53 mm.

Diante dos procedimentos experimentais realizados, é possível afirmar que os jatos sintéticos podem ser uma alternativa viável em resfriamento eletrônico. O que se percebe facilmente durante o desenvolvimento do experimento de resfriamento de elemento de aquecimento, é a maior vida útil dos dispositivos utilizados na geração de jatos sintéticos frente aos ventiladores, conhecidos como *coolers* no resfriamento convencional, que apresentam evidente acúmulo de sujeira que prejudica a eficiência do resfriamento e diminui consideravelmente a vida útil já limitada destes dispositivos.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerida a obtenção de dados de resfriamento com a utilização de outros modelos de perfis de dutos de escoamento, utilizando até mesmo esta mesma bancada experimental, em comparação com o duto retangular utilizado na obtenção dos dados apresentados neste trabalho.

Em relação ao alto-falante utilizado como membrana no gerador de jatos sintéticos, poderia ser analisada a possibilidade de utilização de dispositivo com maior flexibilidade do cone, o que teoricamente ocasionaria maior excursão axial. Consequentemente, seria movimentado uma maior quantidade de volume de fluido na câmara do atuador que seria escoado pelo duto para resfriamento do elemento de aquecimento. Com o uso de cone com maior excursão, talvez seja possível obter resfriamentos satisfatórios utilizando alto-falante com menores dimensões e potência, mesmo que sejam necessárias diferentes frequências de pulsação.

Referente à parte eletrônica do experimento, é sugerido analisar a viabilidade de utilização de modelos de resistores de aquecimento que seja mais resistente mecanicamente e apresente tamanho mais compacto para se adequar às dimensões do elemento de aquecimento utilizado na bancada experimental. Também é possível aprimorar o circuito eletrônico, realizando o desenvolvimento de placas de circuito impresso de acordo com o funcionamento da bancada em substituição à matriz de contatos, que atualmente ocasiona eventual mau contato e ruídos nos sinais elétricos utilizados. A plataforma Arduino também poderia ser melhorada, sendo substituída por outra mais sofisticada e com maior quantidade de bits de resolução, isto proporcionaria maior disponibilidade de funções e precisão nos resultados experimentais.

## REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **ARDUINO & GENUINO PRODUCTS, Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560**. Disponível em <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>> Acesso em: 28 abr. 2015.
- BHAPKAR, U. S.; SRIVASTAVA, A.; AGRAWAL, A. **Acoustic and heat transfer aspects of an inclined impinging synthetic jet**. International Journal of Thermal Sciences, v. 74, p. 145-155, 2013.
- BHOWMIK, H.; TSO, C. P.; TOU, K. W.; TAN, F. L. **Convection heat transfer from discrete heat sources in a liquid cooled**. Applied Thermal Engineering, v. 25, n. 16, p. 145-155, 2005.
- ÇENGEL. Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática**. 4ª Edição, Porto Alegre: Bookman, 2012.
- CHANDRATILLEKE, T. T.; JAGANNATHA, D.; NARAYANASWAMY, R. **Heat transfer enhancement in microchannels with cross-flow synthetic jets**. International Journal of Thermal Sciences, v. 49, p. 504-513, 2010.
- CHAUDHARI, M.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. **Effect of orifice shape in synthetic jet based impingement cooling**. Experimental thermal and fluid science, v. 34, p. 246-256, 2010a.
- CHAUDHARI, M.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. **Heat Transfer Analysis in a Rectangular Duct Without and With Cross-Flow and an Impinging Synthetic Jet**. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. v. 33, n. 2, p. 488-497, 2010b.
- CHAUDHARI, M.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. **Heat transfer characteristics of synthetic jet impingement cooling**. International Journal of Heat and mass Transfer, v. 53, p. 1057-1069, 2010c.
- CHAUDHARI, M.; VERMA, G.; PURANIK, B.; AGRAWAL, A. **Frequency response of a synthetic jet cavity**. Experimental Thermal and Fluid Science. v. 33, p. 439-448, 2009.
- GLEZER, A., AMITAY, M. **Synthetic Jets**. Annu Rev Fluid Mech, v. 34, p. 503-529, 2002.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7ª Edição, Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- ITRS, 2011. System Drivers, Edition 2011. ITRS - International Technoly Roadmap for Semiconductors. Edition 2011.
- MAHALINGAM, R.; HEFFINGTON, S.; JONES, L.; WILLIAMS, R. **Synthetic Jets for forced of electronics**. Electronics Cooling, n. 2, v. 13, 2007.
- MAHALINGAM, R.; RUMIGNY, N.; GLEZER, A. **Thermal management Using Synthetic Jet Ejectors**. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, v. 27, n. 3, p. 439-444, 2004.

MALLINSON, S. G.; KWOK, C.Y.; REIZES, J. A. **Numerical simulation of micro-fabricated zero mass-flux jet actuators.** Sensors and Actuators A, n. 105, p. 229-236, 2003.

MALLINSON, S. G.; REIZES, J.A.; HONG, G.; WESTBURY, P. S. **Analysis of hot-wire anemometry data obtained in a synthetic jet flow.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 28, p. 265-272, 2004.

MATHEUS, R. N.; BALAJI, C. **Numerical simulation of conjugate, turbulent mixed convection heat transfer in a vertical channel with discrete heat sources.** International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 33, p. 908-916, 2006.

MCGUINN, A.; FARRELY, R., PERSOONS, T., MURRAY D. B. **Flow regime characterization of an impinging axisymmetric synthetic jet.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 47, p. 241-251, 2013.

MCGUINN, A.; PERSOONS, T.; VALIORGUE, P.; O'DONOVAN, T. S.; MURRAY, D. B. **Heat Transfer Measurements of an Impinging Synthetic Air Jet with Constant Stroke Length.** 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008.

MUNHOZ, F. **Análise das características de operação e desempenho de micro jatos sintéticos.** Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5ª Edição, São Paulo: Prentice Hall, 2011.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos.** 3ª Edição, São Paulo: Cengage Learning, 2011.

SMITH, B. L.; GLEZER, A. **The formation and evolution of synthetic jets.** Physics of fluids, v. 10, n. 9, p. 2281-2297, 1998.

SMITH, B. L.; SWIFT, G. W. **Synthetic jet at large Reynolds number and comparison to continuous jets.** AIAA, 2003.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.** Disponível em <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>, Acesso em: 28 abr. 2015.

WANG, J.; SHAN, R.; ZHANG, C.; FENG, L. **Experimental investigation of a novel two-dimensional synthetic jet.** European Journal of Mechanics B/Fluids, n. 29, p. 342-350, 2010.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos.** 6ª Edição, Porto Alegre: AMGH, 2011.

WOYCIEKOSKI, M. L. **Estudo experimental de jatos sintéticos para resfriamento.** Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

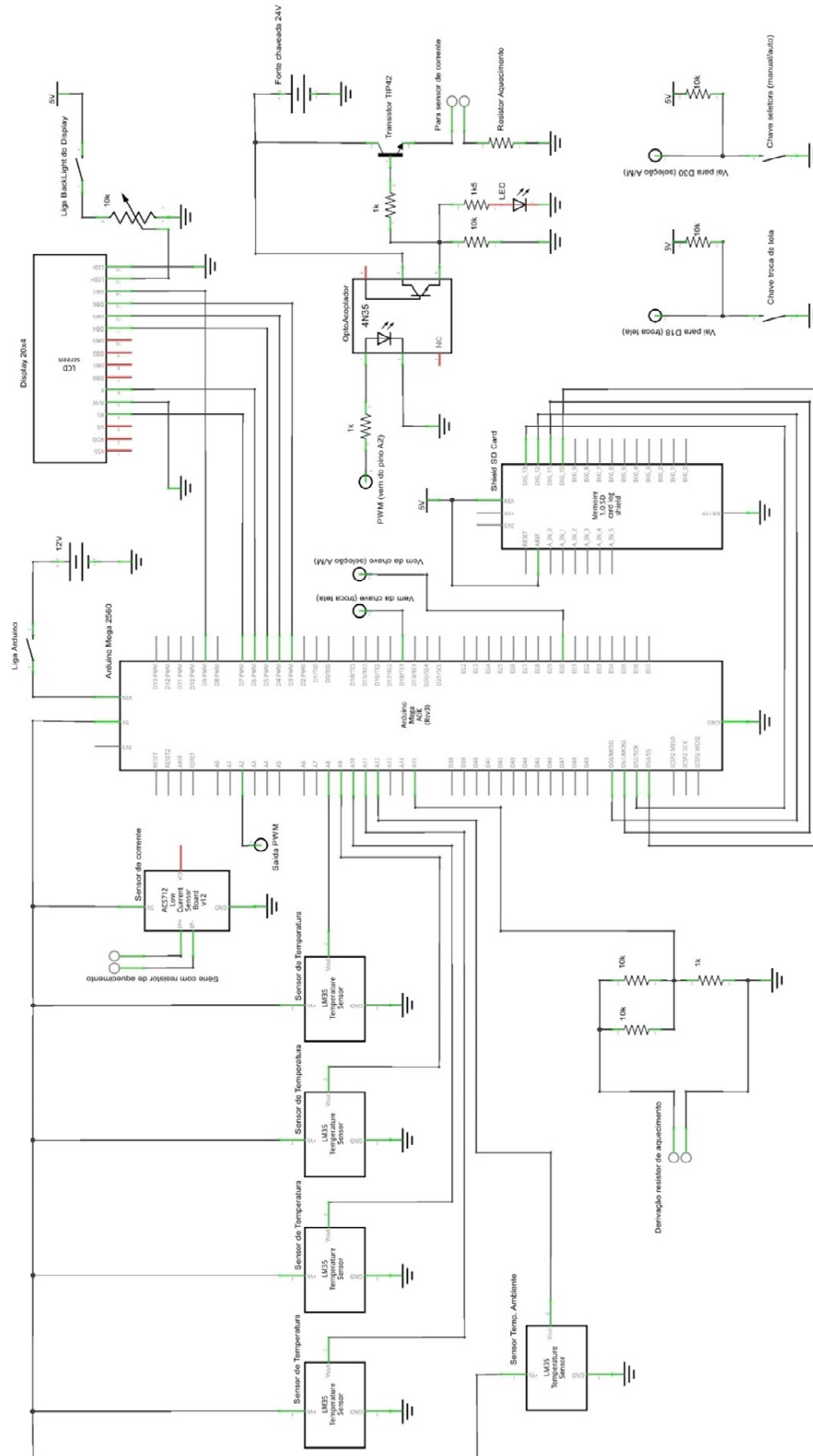
XIAO-MING, T.; JING-ZHOU, Z. **Flow and heat transfer characteristics under synthetic jets impingement driven by piezoelectric actuator.** Experimental Thermal and Fluid Science, v. 48, p. 134-146, 2013.

XU, G. P.; TOU, K. W.; TSO, C. P. **Numerical modeling of turbulent heat transfer from discrete heat sources in liquid-cooled channel.** *International Journal Heat and Mass Transfer*, v. 41, n. 10, p. 1157-1166, 1998.



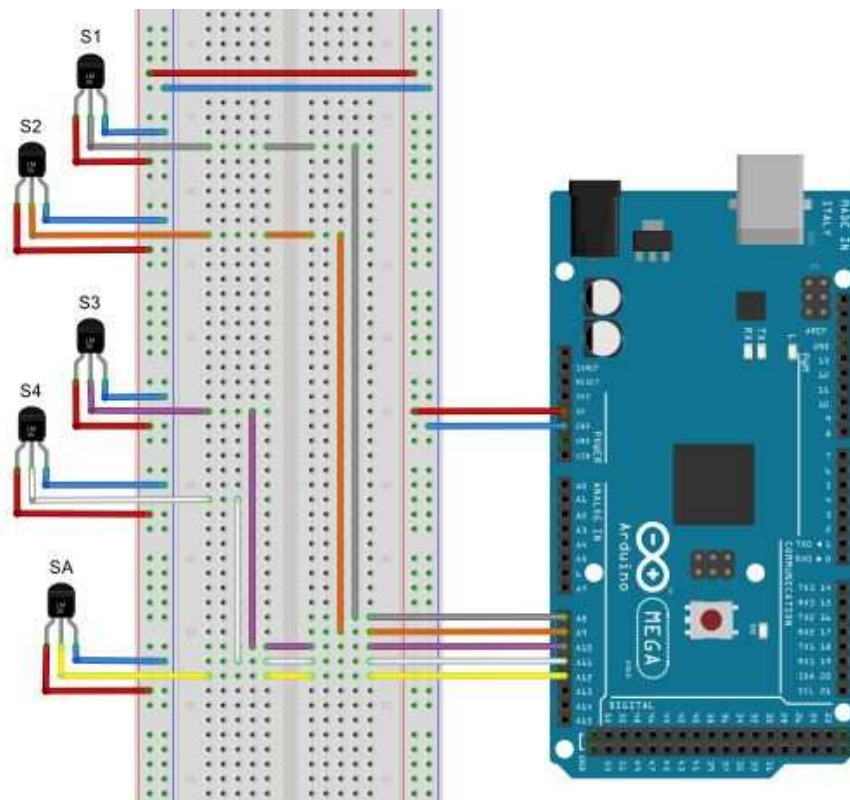
## APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

O circuito eletrônico desenvolvido para controle e aquisição de dados da bancada experimental é apresentado, de modo amplo, em um circuito esquemático:



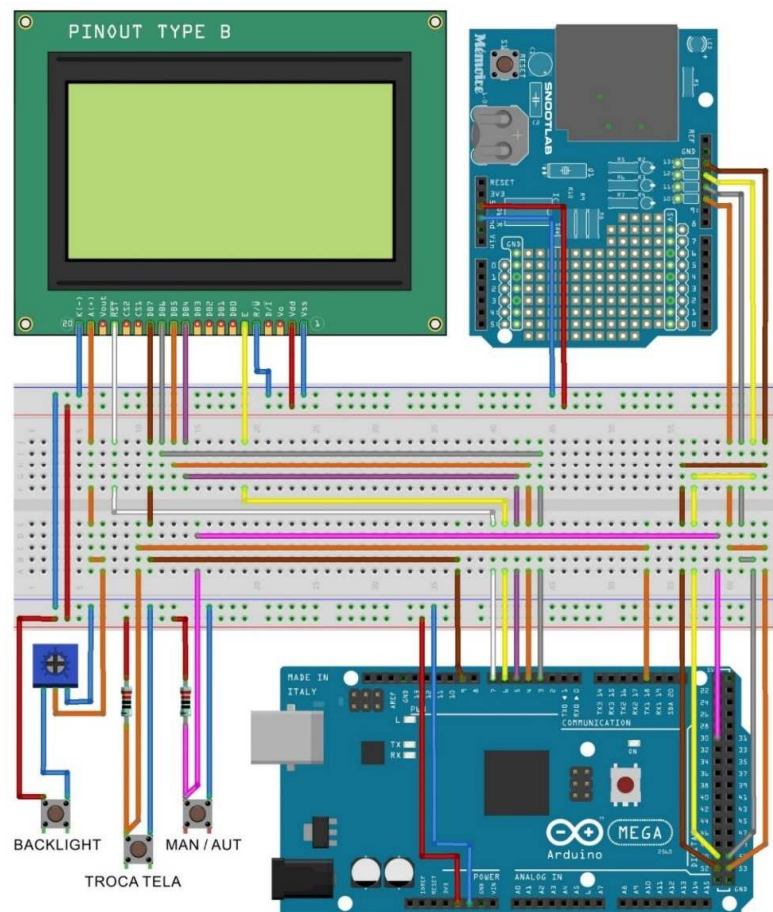
## APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO ELEMENTO DE AQUECIMENTO

O circuito eletrônico desenvolvido para medição da temperatura no elemento de aquecimento da bancada experimental, de acordo com o circuito elétrico apresentado na Fig. 4.13, é mostrado como foi montado na prática e apresentado em conjunto com outros circuitos eletrônicos de acordo com a Fig. 4.11, utilizando a matriz de contatos:



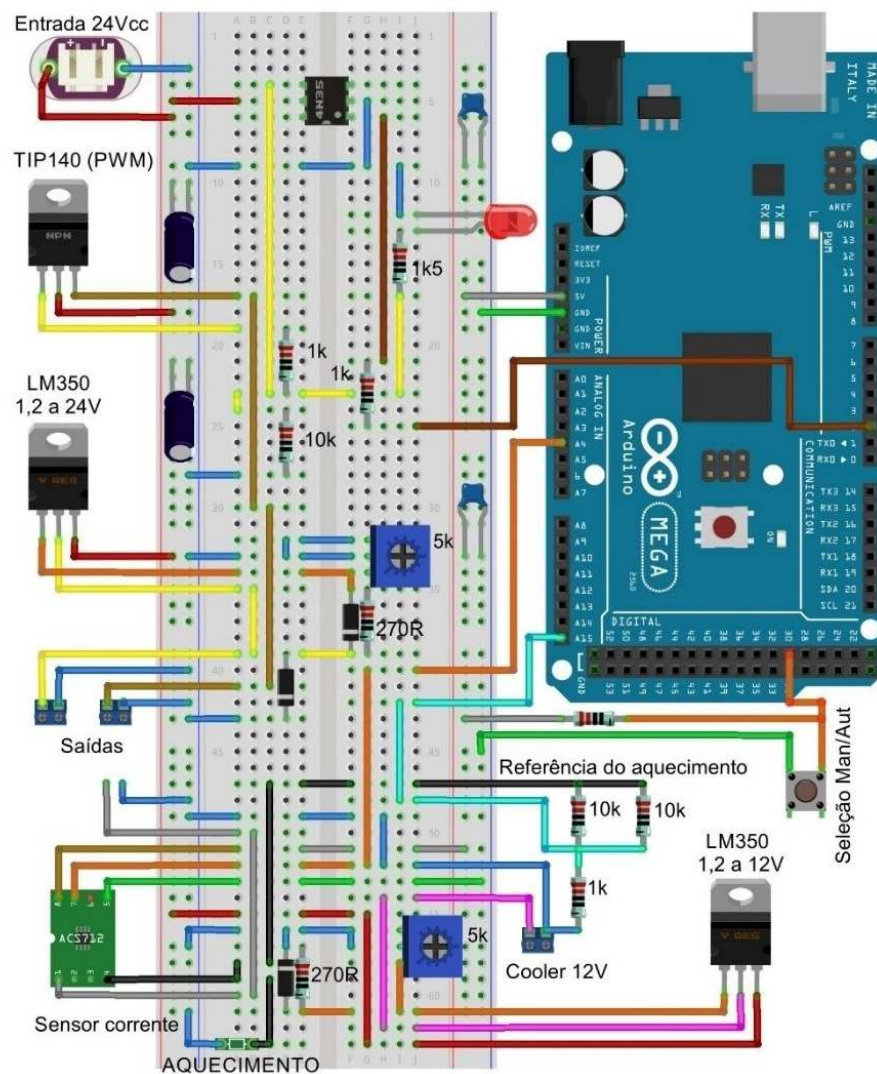
## APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE INDICAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

O circuito eletrônico desenvolvido para indicação e armazenamento de dados obtidos nos testes executados com a bancada experimental, de acordo com o circuito apresentado na Fig. 4.14, é mostrado como foi montado na prática e apresentado em conjunto com outros circuitos eletrônicos de acordo com a Fig. 4.11, utilizando a matriz de contatos:



## APÊNDICE D – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE POTÊNCIA E CONTROLE DA BANCADA EXPERIMENTAL

O circuito eletrônico de potência e controle desenvolvidos para a bancada experimental, equivalente ao circuito apresentado na Fig. 4.15, é mostrado como foi montado na prática em conjunto com outros circuitos eletrônicos de acordo com a Fig. 4.11, utilizando a matriz de contatos:



## APÊNDICE E – PROGRAMAÇÃO DA PLATAFORMA ARDUINO

### //PROGRAMAÇÃO PARA FUNCIONAMENTO DA BANCADA DE RESFRIAMENTO POR JATOS SINTÉTICOS

#### //DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS

```

const byte PS_128 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);
//Muda registradores

const byte PS_16 = (1 << ADPS2);
//Muda registradores

float tensao = 0;           //Declara variável tensão

float tensao_M = 0;        //Declara variável para valor de tensão em manual (temporário)
float tensao_A = 0;        //Declara variável para valor de tensão em automático (temporário)

float temp_1 = 0;          //Declara variável temperatura do sensor 1
float temp_2 = 0;          //Declara variável temperatura do sensor 2
float temp_3 = 0;          //Declara variável temperatura do sensor 3
float temp_4 = 0;          //Declara variável temperatura do sensor 4
float media = 0;           //Declara variável de média das temperaturas (sensores 1 a 4)

float temp_amb = 0;        //Declara variável temperatura do sensor da temperatura ambiente
float corrente = 0;        //Declara variável do shield (sensor) de corrente
float potencia = 0;        //Declara variável de potência de aquecimento do elemento

int resistencia = 0;       //Declara variável "resistência" do elemento de aquecimento

int chaveselatora2A = 0;   //Declara chave seletora 2A (partição A da chave seletora 2)
int chaveselatora2B = 0;   //Declara chave seletora 2B (partição B da chave seletora 2)

int sv = 0;                //Declara "sv"; valor do shield de corrente

int temperaturaprogramada = X; //Seleção da temperatura programada (temperatura do elemento de
                               //aquecimento). Substituir o "X" pela temperatura desejada
int tempinicial = 0;       //Temperatura de início do funcionamento da modulação PWM

int tela = 1;              //Seleção da tela 1, de visualização no display
boolean val = 1;           //Variável booleana 1; definida em valor 1

double voltsporUnidade = X;
double voltsporUnidadeTensao = Y;
                               //Define o valor do "voltsporUnidade" padrão; X é valor numérico
                               //Valor de "X" e "Y" são obtidos pela equação: tensão de referência do
                               //Arduino, dividido por 1024. Estes valores podem necessitar diferença
                               //entre eles, isto devido à necessidade de calibração nos valores de tensão
                               //e temperatura

```



## //DEFINIÇÃO DA TENSÃO ELÉTRICA APLICADA AO ELEMENTO DE AQUECIMENTO

```

void Tensao ()          //Definição da tensão de aquecimento (referência divisor de tensão)
{
double sensor_0 = 0;

chaveselatora2A = digitalRead(28);    //Chave seletora (Manual)
chaveselatora2B = digitalRead(30);    //Chave seletora (Automático)

if (chaveselatora2A == 1)    //Caso a chave seletora 2A esteja em nível lógico 1...
{
for (int i=0; i<10000; i++)    //Realiza dez mil medições da entrada analógica 15
{
sensor_0 = sensor_0 + analogRead(A15);
}
sensor_0 = sensor_0 /10000;    //Retorna a média das dez mil medições realizadas
tensao_M = (sensor_0 * voltsporUnidadeTensao)/(0.98/5.01);
tensao = a + ( b * tensao_M);
//Equação para corrigir/ajustar o valor da tensão indicada no display, e
//utilizada para o aquecimento com o valor indicado em voltímetro digital.
//Estes valores são utilizados na equação gerada através do software
//CurveExpert
}

if (chaveselatora2B == 1)    //Caso a chave seletora 2B esteja em nível lógico 1...
{
for (int i=0; i<10000; i++)    //Realiza dez mil medições da entrada analógica 15
{
sensor_0 = sensor_0 + analogRead(A15);
}
sensor_0 = sensor_0 /10000;    //Retorna a média das dez mil medições realizadas
tensao_A = (sensor_0 * voltsporUnidadeTensao)/(0.98/5.01);
tensao = a + ( b * tensao_A);
//Equação para corrigir/ajustar o valor da tensão indicada no display, e
//utilizada para o aquecimento com o valor indicado em voltímetro digital.
//Estes valores são utilizados na equação gerada através do software
//CurveExpert
}

Serial.println          //Caso necessário, informa na serial (tela), o valor da
(analogRead(A15));    entrada analógica 15

}

```

```

////////////////////////////////////

```







```
//DEFINIÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA 3 DO ELEMENTO DE AQUECIMENTO
```

```
void Temp_3 ()                //Definição da temperatura do sensor 3, na entrada analógica 9
{
  float sensor_3 = 0;
  for (double i=0; i<1000; i++)
  {
    sensor_3 = sensor_3 +
analogRead(A9);
  }
  sensor_3 = sensor_3 /1000;
  temp_3 = sensor_3*voltsporUnidade*100;
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
//DEFINIÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA 4 DO ELEMENTO DE AQUECIMENTO
```

```
void Temp_4 ()                //Definição da temperatura do sensor 4, na entrada analógica 8
{
  float sensor_4 = 0;
  for (double i=0; i<1000; i++)
  {
    sensor_4 = sensor_4 +
analogRead(A8);
  }
  sensor_4 = sensor_4 /1000;
  temp_4 = sensor_4*voltsporUnidade*100;
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
//DEFINIÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE
```

```
void Temp_amb ()            //Definição da temperatura ambiente, na entrada analógica 12
{
  float sensor_6 = 0;
  for (double i=0; i<1000; i++)
  {
    sensor_6 = sensor_6 + analogRead(A12);
  }
  sensor_6 = sensor_6 /1000;
  temp_amb = sensor_6*voltsporUnidade*100;
}
```

```
////////////////////////////////////
```



//DEFINIÇÃO DOS DADOS INFORMADOS NA TELA 1 (PRINCIPALMENTE TEMPERATURAS)

```

void tela_1()                                //Declara a tela 1 (que apresenta temperaturas e contagem)
{
  lcd.clear();                               //Limpa o display
  lcd.setCursor(0,0);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 1
  lcd.print("S1=");                          //Escreve "S1=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(3,0);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 4 x linha 1
  lcd.print(temp_1,2);                       //Escreve o valor lido no sensor 1, com duas casas após a vírgula
  lcd.setCursor(12,0);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 1
  lcd.print("S2=");                          //Escreve "S2=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(15,0);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 16 x linha 1
  lcd.print(temp_2,2);                       //Escreve o valor lido no sensor 2, com duas casas após a vírgula
  lcd.setCursor(0,1);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 2
  lcd.print("S3=");                          //Escreve "S3=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(3,1);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 4 x linha 1
  lcd.print(temp_3,2);                       //Escreve o valor lido no sensor 3, com duas casas após a vírgula
  lcd.setCursor(12,1);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 2
  lcd.print("S4=");                          //Escreve "S4=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(15,1);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 16 x linha 2
  lcd.print(temp_4,2);                       //Escreve o valor lido no sensor 4, com duas casas após a vírgula
  lcd.setCursor(0,3);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 4
  lcd.print("T_AMB=");                       //Escreve "T_AMB=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(6,3);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 7 x linha 4
  lcd.print(temp_amb,2);                     //Escreve o valor lido no sensor de temperatura ambiente, com duas
  //casas após a vírgula
  lcd.setCursor(12,3);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 4
  lcd.print("C=");                           //Escreve "C=" na posição selecionada no display (referente a contagem)
  lcd.setCursor(14,3);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 4
  lcd.print(medida);                         //Escreve o valor de medições realizadas
  lcd.setCursor(0,2);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 3
  lcd.print("MEDIA=");                       //Escreve "MEDIA=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(6,2);                        //Posiciona o cursor do display na coluna 7 x linha 3
  lcd.print(media);                          //Escreve o valor da média dos sensores de temperatura
  // (Sensores 1 a 4)
  lcd.setCursor(14,2);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 15 x linha 3
  lcd.print("T=");                           //Escreve "T=" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(16,2);                       //Posiciona o cursor do display na coluna 17 x linha 3
  lcd.print(temperaturaprog);               //Escreve o valor de setpoint de temperatura programada
}

```

////////////////////////////////////

```
//DEFINIÇÃO DOS DADOS INFORMADOS NA TELA 2 (DADOS DE AQUECIMENTO)
```

```
void tela_2 () //Declara a tela 2 (que apresenta parâmetros de aquecimento)
{
  lcd.clear(); //Limpa o display
  lcd.setCursor(0,0); //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 1
  lcd.print //Escreve "DADOS AQUECIMENTO" na posição selecionada no display
  (**AQUECIMENTO**);
  lcd.setCursor(0,1); //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 2
  lcd.print("TENSAO:"); //Escreve "TENSAO:" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(12,1); //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 2
  lcd.print(tensao,2); //Escreve o valor lido de tensão, com duas casas após a vírgula
  lcd.setCursor(19,1); //Posiciona o cursor do display na coluna 20 x linha 2
  lcd.print("V"); //Escreve "V" na posição selecionada no display (unidade da tensão)
  lcd.setCursor(0,2); //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 3
  lcd.print("CORRENTE:"); //Escreve "CORRENTE:" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(12,2); //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 3
  lcd.print(corrente,3); //Escreve o valor lido de corrente, com três casas após a vírgula
  lcd.setCursor(19,2); //Posiciona o cursor do display na coluna 20 x linha 3

  lcd.print("A"); //Escreve "A" na posição selecionada no display (unidade da corrente)
  lcd.setCursor(0,3); //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 4
  lcd.print("POTENCIA:"); //Escreve "POTENCIA:" na posição selecionada no display
  lcd.setCursor(12,3); //Posiciona o cursor do display na coluna 13 x linha 4
  lcd.print(potencia,3); //Escreve o valor calculado de potência, com três casas após a vírgula
  lcd.setCursor(19,3); //Posiciona o cursor do display na coluna 20 x linha 4
  lcd.print("W"); //Escreve "W" na posição selecionada no display (unidade da potência)

  if(chaveselatora2A == 1) //Função caso chave seletora 2A esteja em 1 (indica "MAN" no display)
  {
    lcd.setCursor(17,0);
    lcd.print("MAN");
  }

  if(chaveselatora2B == 1) //Função caso chave seletora 2B esteja em 1 (indica "AUT" no display)
  {
    lcd.setCursor(17,0);
    lcd.print("AUT");
  }
}
```

```
////////////////////////////////////
```

```
//DEFINIÇÃO DOS DADOS A SEREM GRAVADOS EM PLANILHA NO SD CARD
```

```
void Escreve_dados ()           //Declaração de escrita de dados no SD Card
{
  File dataFile =
  SD.open("datalog.csv",       //Abre planilha no SD para escrita
  FILE_WRITE);

  if (dataFile)                //Se a planilha foi criada corretamente no SD Card...
  {
    dataFile.print(medida);     //Grava o número da medida realizada
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(temp_1,2);  //Grava medida de temperatura do sensor1
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(temp_2,2);  //Grava medida de temperatura do sensor2
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(temp_3,2);  //Grava medida de temperatura do sensor3
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(temp_4,2);  //Grava medida de temperatura do sensor4
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(media,2);    //Grava média de temperatura dos sensores (1 a 4)
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(temp_amb,2); //Grava medida de temperatura do sensor5 (ambiente);
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(tensao,2);   //Grava o valor de potência calculado
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(corrente,2); //Grava o valor de tensão medida
    dataFile.print(";");       //Passa para a próxima coluna
    dataFile.print(potencia,2); //Grava o valor de corrente medida
    dataFile.println("");      //Nova linha no arquivo de dados
    dataFile.close();          //Fecha o arquivo
  }

  else                           //Caso contrário...
  {
    lcd.clear();                //Limpa o display
    lcd.setCursor (1,1);        //Posiciona o cursor do LCD na coluna 2 x linha 2
    lcd.print
    ("Falha ao gravar!");       //Exibe mensagem de erro na abertura do arquivo
  }
}
```

```
////////////////////////////////////
```

## //VERIFICAÇÕES DE INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA

```

void setup ()                //Declara as variáveis do setup
{
  ADCSRA &= ~PS_128;        //Remove prescale of 128
  ADCSRA |= PS_16;          //Add prescale of 16 (1MHz)
  //analogReference(EXTERNAL);
  //Define as leituras analógicas como padrão

  pinMode(0, OUTPUT);       //Define o pino digital 0 como saída
  pinMode(10, OUTPUT);      //Define o pino digital 10 como saída
  lcd.begin(20, 4);         //Inicializa display com 20 caracteres nas 4 linhas
  pinMode
(chipSelect, OUTPUT);      //Habilita funcionamento do chip SD Card
  pinMode                    (18, //Habilita o pino 18 como pull-up do seletor de tela
INPUT_PULLUP);
  Serial.begin(9600);

  Timer3.initialize(100);   //Seleção da frequência PWM do pino selecionado(2,3,5), com tempo
                           em microssegundos.

  //cabecalho ();          //Declara o cabeçalho do arquivo que armazena os dados

tela_inicial();            //Declara a tela inicial

if (teste!=!SD.begin (chipSelect)) //Testa inicialização do SD Card
{
  lcd.clear();              //Limpa o display

  lcd.setCursor(1,1);       //Posiciona o cursor do display na coluna 2 x linha 2
  lcd.print
("V E R I F I C A R !");    //Exibe mensagem de erro caso falhe a inicialização do SD Card

  lcd.setCursor(2,3);       //Posiciona o cursor do display na coluna 3 x linha 4
  lcd.print
("Falha no SD CARD");      //Continuidade da exibição de mensagem de erro, caso falhe a
                           inicialização do SD Card
  delay(1000);              //Aguarda 1 segundo
  lcd.clear();              //Limpa o display
  delay (300);              //Aguarda 1 segundo

  lcd.setCursor(1,1);       //Posiciona o cursor do display na coluna 2 x linha 2
  lcd.print
("V E R I F I C A R !");    //Exibe mensagem de erro caso falhe a inicialização do SD Card

  lcd.setCursor(2,3);       //Posiciona o cursor do display na coluna 3 x linha 4
  lcd.print
("Falha no SD CARD");      //Continuidade da exibição de mensagem de erro, em caso de falha na
                           inicialização do SD Card
  delay(300);              //Aguarda 1 segundo

```

```

    lcd.clear();           //Limpa o display
    delay (300);          //Aguarda 1 segundo
    lcd.setCursor(1,1);   //Posiciona o cursor do display na coluna 2 x linha 2
    lcd.print
("V E R I F I C A R !"); //Exibe mensagem de erro caso a inicialização do SD Card falhe
    lcd.setCursor(2,3);   //Posiciona o cursor do display na coluna 3 x linha 4
    lcd.print
("Falha no SD CARD");   //Continuidade da exibição de mensagem de erro, em caso de falha na
                          //inicialização do SD Card
    delay(1000);          //Aguarda 1 segundo
    lcd.clear();          //Limpa o display
    delay (1000);         //Aguarda 1 segundo
    }

else
    {
    lcd.setCursor (6,1);   //Posiciona o cursor do display na coluna 7 x linha 2
    lcd.print("SD CARD"); //Exibe mensagem de inicialização correta do SD Card
    lcd.setCursor (0,2);   //Posiciona o cursor do display na coluna 1 x linha 3
    lcd.print
("iniciou corretamente"); //Complementa mensagem de inicialização correta do SD Card
    delay(3000);           //Aguarda 3 segundos
    lcd.clear();           //Limpa o display
    }
}

////////////////////////////////////

//VERIFICAÇÕES NO LOOP E SELEÇÃO DE TELA PARA VISUALIZAÇÃO

void loop ()              //Declara as variáveis utilizadas no loop
    {
    Tensao ();             //Declara a variável da tensão
    Corrente ();           //Declara a variável da corrente
    //Potencia ();         //Declara a variável da potência
    Temp_1 ();             //Declara a variável do sensor de temperatura 1
    Temp_2 ();             //Declara a variável do sensor de temperatura 2
    Temp_3 ();             //Declara a variável do sensor de temperatura 3
    Temp_4 ();             //Declara a variável do sensor de temperatura 4

    media = (temp_1 + temp_2 + temp_3 + temp_4)/4;
                          //Declara a variável da média dos sensores de temperatura

    PWM_();                //Declara a variável PWM

    Temp_amb ();           //Declara a variável do sensor de temperatura ambiente
    //Potencia ();         //Declara a variável do cálculo da potência

    Escreve_dados ();      //Declara a variável da seleção de tela

```



```
    val = digitalRead (18);      //Declara a variável da entrada digital, que habilita a tela a ser visualizada
    if (val == LOW)             //Define o nível lógico que seleciona cada uma das telas
tela_2();else tela_1();
    delay (1000);              //Aguarda 1 segundo
    medida = medida +1;        //Incrementa valor a cada leitura realizada (contagem)
}
```

////////////////////////////////////

# ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE



Usine et siège social  
Zone industrielle - B.P.16 - 24700 MONTPON  
Tél. : 05 53 80 85 00 - Fax : 05 53 80 16 81  
E-mail : kimo@kimo.fr - Site : www.kimo.fr

www.kimo.fr

Instruments de Mesure et de Contrôle

## CERTIFICAT D'AJUSTAGE ADJUSTING CERTIFICATE

1 / 1

N°MAM1403669

Désignation : Thermo-anémomètre VT50  
Designation : Thermo-anemometer VT50

Quantité :  
Quantity :  
1

N° Série App.\Sonde : 1P140610315  
Serial number :

Constructeur : KIMO  
Manufacturer :

Echelle : - TEMPERATURE : -20 à 80 °C  
Range : - VITESSE D'AIR : 0,15 à 3 m/s; 3,1 à 30 m/s

Nous certifions que l'appareil dont les références sont rappelées ci-dessus a été ajusté dans nos laboratoires, conformément aux méthodes et recommandations des normes en vigueur. L'appareil répond aux spécifications et caractéristiques techniques du constructeur. L'ensemble de nos instruments de référence utilisés pour l'ajustage est vérifié périodiquement par rapport aux étalons nationaux. Le raccordement à la chaîne nationale d'étalonnage est assuré par les équipements suivants :

We guarantee that the specified above unit was adjusted in our laboratories, according to the methods and recommendations of the current standards of calibration. This device unit meets the technical specifications of the manufacturer. All referenced instruments used for the calibration are periodically inspected and tested with national standards. The traceability to the national calibration standards is assured by the following equipment :

### Domaines d'ajustage / Adjusting parameter :

#### VITESSE D'AIR

ETV007 n°0109 (sonde LDA-200802001), raccordement COFRAC ou membre de l'EA A1415741G.

ETV007 n°0109 (sonde LDA-200802001), connection to COFRAC or member of the EA A1415741G.

#### TEMPERATURE

ETT011-1 n°B0500639-10-001 (sonde n°02009703), raccordement COFRAC ou membre de l'EA P121712/2.

ETT016-5 n°125427, raccordement COFRAC ou membre de l'EA 13-C74-T377 R01.

ETT016-7 n°125427, raccordement COFRAC ou membre de l'EA P107651/1.

ETT011-1 n°B0500639-10-001 (sonde n°02009703), connection to COFRAC or member of the EA P121712/2.

ETT016-5 n°125427, connection to COFRAC or member of the EA 13-C74-T377 R01.

ETT016-7 n°125427, connection to COFRAC or member of the EA P107651/1.

Ajustage effectué par DOUAY Stephanie  
Adjusting performed by

Date : 15 Juillet 2014

Responsable Métrologie  
Metrology Manager

Sébastien COUPEAU

P.O. Marie Laure BOURAUD  
Service Laboratoires

|   |   |  |   |  |   |   |  |   |
|---|---|--|---|--|---|---|--|---|
| Aquitaine<br>☎ 05 53 80 85 00<br>☎ 05 53 80 16 81 | Alsace-Lorraine<br>☎ 03 88 48 16 90<br>☎ 03 88 48 22 08 | Bretagne<br>☎ 02 95 54 77 00<br>☎ 02 99 54 77 09 | Midi-Pyrénées<br>☎ 05 61 72 84 00<br>☎ 05 61 72 84 09 | Nord<br>☎ 03 20 90 92 95<br>☎ 03 20 90 92 99 | Paris Ouest<br>☎ 01 30 02 81 20<br>☎ 01 30 02 81 21 | Paris Est<br>☎ 01 60 06 14 72<br>☎ 01 64 80 46 15 | PACA<br>☎ 04 42 97 33 94<br>☎ 04 42 97 33 98 | Rhône-Alpes<br>☎ 04 72 15 88 72<br>☎ 04 72 15 63 82 |
|---|---|--|---|--|---|---|--|---|

SA au capital de 1 027 657 € - RCS Périgueux 349 282 095 - Siret 349 282 095 000 18 - APE 2651 B - TVA FR 14 349 282 095

KIMO - Société du Groupe KGF